

文章编号: 1000-7598 (2013) 05-1325-06

加载历程对配径碎煤渗透特性影响的试验研究

王路珍^{1,2,3}, 陈占清^{1,3}, 孔海陵², 莘海德³

(1. 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 221008;

2. 盐城工学院 基础教学部, 江苏 盐城 224051; 3. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 为了证实加载历程对破碎煤样渗透特性的影响, 利用一套由齿轮泵、换向阀、溢流阀和渗透仪等组成的渗透回路, 在 CMT5305 型电子万能试验机试验系统上测试了配径碎煤在两种不同试验方案下的渗透特性, 得到了两种方案配径碎煤的渗流速度、渗透率、非 Darcy 流 β 因子与孔隙度的关系。研究表明: ①第 1 种试验方案的渗流速度和渗透率与孔隙度的关系用幂函数拟合, 第 2 种试验方案的渗流速度和渗透率与孔隙度的关系可用指数函数拟合。②孔隙度较大时, 渗透率和非 Darcy 流 β 因子与加载历程有关; 孔隙度较小时, 渗透率和非 Darcy 流 β 因子趋于稳定, 与加载历程无关。③随着孔隙度的减小, 方案 1 非 Darcy 流 β 因子由负变正, 配径碎煤的渗透性加强; 方案 2 非 Darcy 流 β 因子始终为负值, 配径碎煤的渗透性减弱。④两种方案的非 Darcy 流 β 因子与孔隙度均可采用三次多项式拟合, 多项式的系数与加载历程有关。

关 键 词: 加载历程; 配径碎煤; 渗透特性; 试验

中图分类号: TD 315

文献标识码: A

Experimental study of impact of loading history on permeability characteristics of broken coal with different grain size gradations

WANG Lu-zhen^{1,2,3}, CHEN Zhan-qing^{1,3}, KONG Hai-ling², SHEN Hai-de³

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

2. Department of Fundamental Sciences Teaching, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, Jiangsu 224051; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In order to confirm the impact of the loading history on the permeability characteristics of broken coal, the permeability characteristics of broken coal with different grain size gradations are tested under two experimental schemes by the CMT5305 electronic universal testing machine with a seepage circuit which is composed of gear pump, reversing valve, overflow valve, permeameter, etc. And the relations between the seepage velocity, permeability, the non-Darcy flow β factor and the porosity are obtained under the two experimental schemes. The experimental results show: ①The power function fits the relationship between the seepage velocity, permeability and the porosity in the first experimental scheme; and exponential function fits the same relationship in the second scheme. ②When the porosity is large, the permeability and the non-Darcy flow β factor bear a relation to the loading history, while when the porosity is small, they tend to be stable and are independent of the loading history. ③With the decrease of the porosity, the non-Darcy flow β factor changes from negative to positive in the first scheme; and the permeability characteristics of the broken coal with different grain size gradations are strengthened; but the non-Darcy flow β factor is always negative in the second scheme and the permeability characteristics are weakened. ④Relation between the non-Darcy flow β factor and the porosity can be fitted by the cubic polynomial, of which the coefficients have connections with the loading history.

Key words: loading history; broken coal with different grain size gradations; permeability characteristics; experiment

1 引 言

深部地下矿体的采出引起采场围岩应力重新分

布, 甚至超过其峰值强度, 导致围岩裂隙充分发育, 岩体甚至处于破碎状态。在采矿和地下工程中水和瓦斯的突出机制一直是未解决的难题^[1]。因

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50974107); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ12_0924); 盐城工学院应用基础研究项目(No. XKR2010010); 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(No. SKLGDUEK1014)。

第一作者简介: 王路珍, 女, 1982 年生, 博士, 讲师, 主要从事力学教学与岩石渗流的非线性动力学行为方面的研究工作。E-mail: wangluzhen5@126.com

通讯作者: 陈占清, 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂系统动力学及渗流力学的理论和试验方面的研究工作。

E-mail: chenchanqing@vip.163.com

此,水和瓦斯等流体在破碎岩体中的渗流问题逐渐成为目前学者们研究的热点。

从 20 世纪 70 年代开始,国内外已有不少学者对非承压破碎岩体的渗透特性进行试验研究。Kogure^[2]的试验表明,破碎岩体渗流由层流状态转入紊流状态存在某一临界水力梯度,并给出临界水力梯度和有效粒径的关系式。Mc Corquodall 等^[3]对大范围粒径的破碎岩石和卵石进行 1 000 多次的渗透试验,得到各组粒径的破碎岩石其渗透系数的无因次方程。Stephenson 等^[4]进行大量试验,总结得出在大 Reynolds 数情况下,水力梯度与流速的平方成正比的结果。Pradeep Kumar 等^[5]试验表明,破碎岩石渗流服从 Forchheimer 方程和 Missbach 方程。中国学者研究了破碎岩体颗粒尺寸、含水饱和度对渗透性的影响^[6-9]。徐天有^[6]和邱贤德^[7-8]等对不同粒径尺寸的碎石进行试验,研究了孔隙率、颗粒几何尺寸和流动状态的关系。高玉峰等^[9]对不同饱和方式和泥岩含量的碎石进行渗透试验,得到泥岩含量、饱和方式与渗透系数的关系。李广悦^[10]、丁德馨^[11]等选配了 7 组不同级配的铀矿堆石,建立了渗透率和流态指数的 ANFIS 模型。

随着地下工程和煤炭开采不断向深部发展,承压破碎岩体的渗透性试验研究逐渐引起重视,并取得一些研究成果^[12]。缪协兴^[13]、陈占清^[14]、刘卫群^[15]等利用一种破碎岩体压实渗透仪的专利装置,基于 MTS815 试验系统进行了破碎岩体的渗流试验研究。孙明贵等^[16]研究了 4 种粒径破碎砂岩的水渗流特性,采用二元九参数回归法得到渗透特性与载荷、颗粒直径的关系。黄先伍等^[17]研究了破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系,指出渗透率、非 Darcy 流 β 因子与孔隙率之间可用幂函数拟合,同时提出破碎岩石的渗透特性与加载历史有关,但没有进一步分析渗透特性与加载历史的关系。李顺才等^[18]研究了破碎砂岩、煤矸石及灰岩在单一粒径和配径下非 Darcy 流的渗透特性,讨论了 Darcy 流偏离因子的正负号。马占国等^[19-21]利用载荷控制的方法研究了 4 种单一粒径下破碎页岩、泥岩和煤岩的渗透特性,分析了各种粒径破碎岩石的渗流速度、轴向应力及渗透压差等因素对渗透系数的影响,但没有进一步给出渗透特性与压实程度(孔隙度)的关系。孔海陵^[22]、黄伟^[23]研究了破碎煤岩体考虑孔隙结构和孔隙度时的渗透特性,指出破碎煤岩的渗透率与孔隙度之间满足幂函数关系,渗透率与应力满足负指数函数关系。以上研究都没有考虑加载历程对渗透特性的影响。

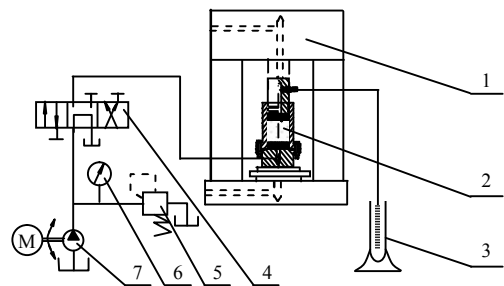
在深部开采环境中,破碎煤岩体处于高轴压、

高围压、高水头等复杂承压状态下,其渗流过程往往伴随着岩体结构变形。破碎岩体的运动引起其渗透特性变化,同时渗流过程影响破碎岩体结构变形,二者互相制约,整个渗流(甚至发生突水)过程中破碎岩体承受的轴向压力和渗透压差交替作用,如果运用单一的加载方式研究破碎煤岩体的渗透特性是不全面的。此外,破碎煤岩体的碎化程度各异,试验分析破碎岩样按不同粒径混合配比后的渗透特性对实际生产更具有指导意义。本文尝试用两种不同的加载历程测试破碎煤样的渗透特性,研究加载历程对煤样渗透特性的影响。

2 试验系统及原理

2.1 试验系统

破碎煤样渗透特性测试的试验系统主要由渗透回路和 CMT5305 型电子万能试验机组成,其中渗透回路由破碎岩体压实渗透仪(ZL02219458.4)、齿轮泵、溢流阀、换向阀、压力表和量筒等组成(如图 1 所示)。



1—CMT5305 型电子万能试验机; 2—破碎岩体压实渗透仪;
3—量筒; 4—换向阀; 5—溢流阀; 6—压力表; 7—齿轮泵

图 1 破碎煤样渗透试验系统

Fig.1 Test system for the measurement of permeability of broken coal

破碎岩体压实渗透仪^[13]是该试验的主体,其设计主要考虑试验时的密封效果。渗透仪下端的输液管与油箱联通。启动齿轮泵后,可以将油箱内液体(液压油 DTE22,该液体的质量密度 $\rho = 874 \text{ kg/m}^3$,运动黏度系数 $\nu = 22.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)以一定的溢流阀开启压力输入渗透仪。渗透仪上端的出液管与量筒联接,直接测量单位时间流经破碎煤样的体积流量 Q 。CMT5305 型电子万能试验机试验系统中的控制软件可精确控制渗透仪活塞的位移,渗透仪活塞与缸筒做相对运动,使渗透仪内的破碎煤样产生轴向压缩变形,其孔隙结构发生变化。

2.2 试验方案

为了研究加载历程对配径碎煤渗透性的影响,本文设计了两种试验方案来完成碎煤的渗透试验。

方案1(见图2)考虑煤岩体的运动将会导致其渗透性的变化,先加轴向位移改变破碎煤样的孔隙结构,再改变溢流阀开启压力;方案2(见图3)考虑破碎煤样的渗流将会制约其结构变形,先开启一定溢流阀压力来控制破碎煤样的渗透压差,再改变轴向位移。渗透试验过程中不卸载。

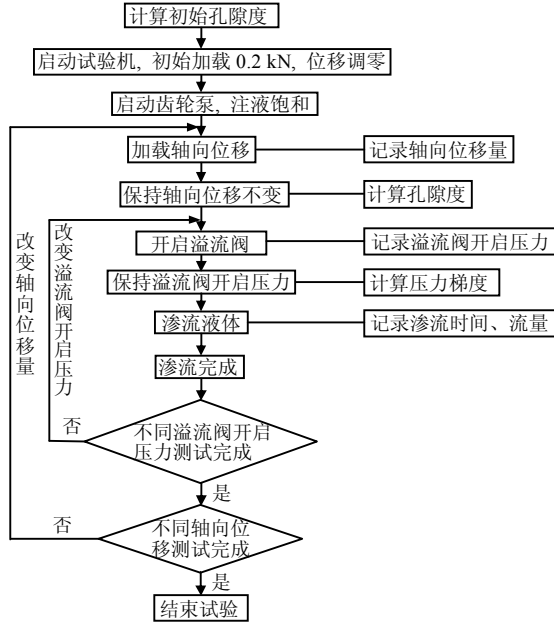


图2 方案1试验流程图

Fig.2 Experiment flow chart of first scheme

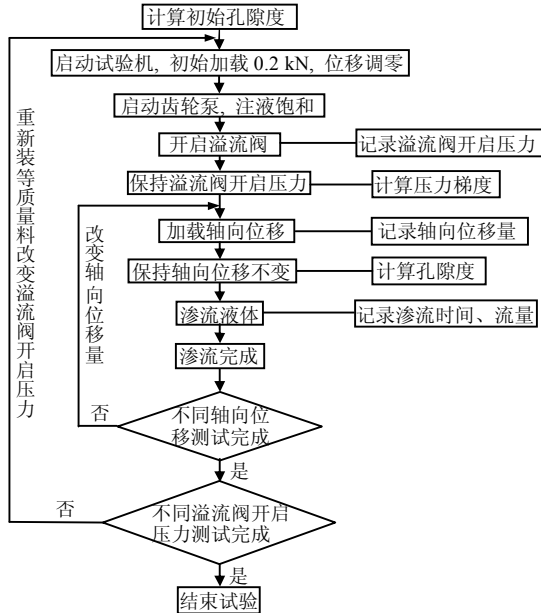


图3 方案2试验流程图

Fig.3 Experiment flow chart of second scheme

2.3 试验原理及方法

试验前测试煤的质量密度 $\rho_{\text{煤}} = 1470.8 \text{ kg/m}^3$ 。试验所用试样是5种单一粒径为2.5~5 mm、5~

10 mm、10~15 mm、15~20 mm、20~25 mm 破碎煤样按照质量1:1:1:1:1配比而成。每次试验均称取定量 $m = 250 \text{ g}$ 的配径煤样,混合均匀后装入渗透仪缸筒内,并测出自然盛放状态下配径煤样的高度 h_0 ,则初始孔隙度 ϕ_0 为

$$\phi_0 = 1 - \frac{m}{\rho_{\text{煤}} \pi a^2 h_0} \quad (1)$$

式中: a 为渗透仪缸筒的内半径。

两种方案下配径碎煤的孔隙度均设置为5级。试验中,随着破碎煤样孔隙结构的变化,其孔隙度 ϕ 可由下式计算:

$$\phi = 1 - \frac{m}{\rho_{\text{煤}} \pi a^2 h_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (2)$$

式中: $h_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 为破碎煤样的当前高度,可根据电子万能试验机的位移计算。

破碎煤样在渗流过程满足 Forchheimer 关系^[14],本次试验数据都是在渗流达到稳定时测得,因此,简化的 Forchheimer 关系式为

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{k} v + \rho \beta v^2 \quad (3)$$

式中: $\frac{\partial p}{\partial x}$ 为压力梯度; v 为渗流速度; ρ 为渗流液体的密度; μ 为渗流液体的动力黏度; k 为破碎岩体的非 Darcy 流渗透率; β 称为非 Darcy 流因子。

两种方案下配径碎煤的溢流阀开启压力均设置为5级。试验中,待渗流稳定平衡时,渗透压差沿着渗流方向线性下降,渗流入口端为溢流阀开启压力 $p_j (j = 1, 2, 3, 4, 5)$,渗流出口端与大气相通,用 p_0 表示,因此,压力梯度的计算公式为

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_j - p_0}{h_i} \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (4)$$

利用测得的单位时间流经破碎煤样的体积流量 Q 计算出渗流速度:

$$v = \frac{Q}{\pi a^2} \quad (5)$$

随着溢流阀开启压力的改变,压力梯度和渗流速度随之改变,根据式(3)在平面直角坐标系上绘出 $\frac{\partial p}{\partial x} - v$ 曲线,通过二次多项式拟合得到非 Darcy 流渗透率 k 和非 Darcy 流 β 因子。

本文试验中,每组试验样本数量均为3,即两种方案共完成渗透试验18缸。其中,方案1的试验数量为3缸,方案2有5级溢流阀开启压力,每级溢流阀开启压力下试验数量各为3缸。试验结果取

3 缸的平均值进行分析。

3 试验结果分析

破碎煤样在承压渗透试验过程中, 孔隙度是个变量。同时, 由于孔隙结构的变化引起破碎煤样渗透特性的变化。因此, 本文重点分析配径碎煤在两种不同加载历程下渗流速度、渗透率、非 Darcy 流 β 因子与孔隙度的关系。

3.1 渗流速度-孔隙度关系

图 4 给出了渗透压差为 1.5 MPa 和 2.0 MPa 时两种加载历程下的渗流速度-孔隙度关系曲线。可以看出: 渗流速度随着孔隙度的减小而变慢。从图 4(a) 可以看出, 在相同孔隙度下, 渗透压差 2.0 MPa 时的渗流速度比 1.5 MPa 时的渗流速度大; 随着孔隙度的减小, 渗透压差越大, 渗流速度减小越快; 在孔隙度为 0.280~0.133 范围内, 渗流速度的量级为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ m/s。从图 4(b) 可以看出, 随着孔隙度的减小, 两种渗透压差下的渗流速度变化趋势基本一致; 在孔隙度为 0.257~0.117 范围内, 渗流速度的量级为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ m/s, 方案 2 比方案 1 的最小渗流速度小一个数量级。可见渗流速度不仅与孔隙度和渗透压差有关, 还与加载历程有关。

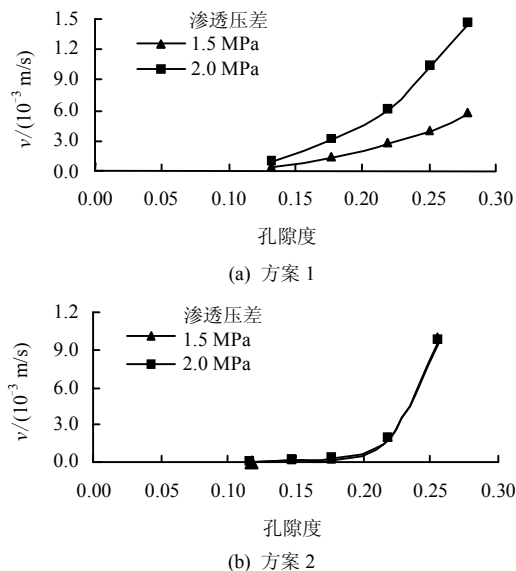


图 4 不同加载条件下渗流速度-孔隙度关系曲线
Fig.4 Relations of seepage velocity and porosity under different loadings

表 1 是分别用指数函数和幂函数拟合的两种加载历程下渗流速度与孔隙度的关系, 并给出了相关系数。可见, 方案 1 的渗流速度和孔隙度用幂函数拟合较好, 方案 2 的渗流速度和孔隙度用指数函数拟合较好。

表 1 渗流速度-孔隙度函数关系拟合

方案	渗透压差 /MPa	指数函数拟合		幂函数拟合	
		公式	相关系数 R^2	公式	相关系数 R^2
1	1.5	$v = 6.08 \times 10^{-6} e^{16.7\phi}$	0.97	$v = 4.13 \times 10^{-2} \phi^{3.33}$	1.00
	2.0	$v = 10.04 \times 10^{-6} e^{18.3\phi}$	0.98	$v = 1.53 \times 10^{-1} \phi^{3.63}$	1.00
2	1.5	$v = 3.94 \times 10^{-8} e^{48.2\phi}$	0.97	$v = 7.01 \times 10^{-2} \phi^{8.52}$	0.95
	2.0	$v = 5.77 \times 10^{-8} e^{47.4\phi}$	0.97	$v = 9.02 \times 10^{-2} \phi^{8.52}$	0.94

3.2 渗透率-孔隙度关系

图 5 给出了两种方案的渗透率-孔隙度曲线。可以看出: 渗透率随着孔隙度的减小而降低。方案 1 渗透率的量级为 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ m², 其中在最大孔隙度为 0.280 时, 渗透率量级为 10^{-13} m²; 方案 2 渗透率的量级为 $10^{-12} \sim 10^{-15}$ m², 其中在最大孔隙度为 0.257 时, 渗透率量级为 10^{-12} m²。可见, 并不是孔隙度越大, 渗透率量级越大, 而是与加载历程有关。但在较小孔隙度下, 渗透率趋于稳定数量级, 与加载历程无关。

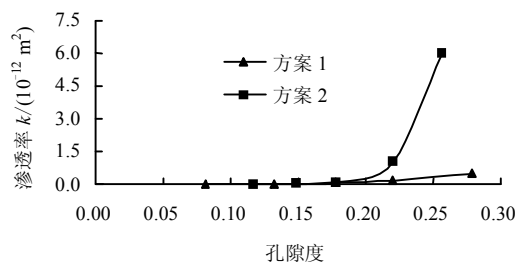


图 5 不同加载条件渗透率-孔隙度曲线
Fig.5 Relations of permeability and porosity under different loadings

表 2 是分别用指数函数和幂函数拟合的两种加载历程下渗透率与孔隙度的关系, 并给出了相关系数。可见, 方案 1 的渗透率和孔隙度关系用幂函数拟合较好, 该结果与文献[22]试验结果具有较好的一致性, 虽然两者试验系统不同, 但其加载历程基本一致, 即先加轴向位移改变破碎煤样的孔隙结构, 再改变溢流阀开启压力。方案 2 的渗透率和孔隙度关系用指数函数拟合较好。可见, 渗透率与孔隙度的函数关系需要综合考虑加载历程的影响。

表 2 渗透率-孔隙度函数关系拟合

方案	指数函数拟合		幂函数拟合	
	公式	相关系数 R^2	公式	相关系数 R^2
1	$k = 1.81 \times 10^{-15} e^{20.6\phi}$	0.98	$k = 3.09 \times 10^{-11} \phi^{3.36}$	1.00
2	$k = 1.44 \times 10^{-17} e^{50.4\phi}$	1.00	$k = 8.33 \times 10^{-7} \phi^{8.96}$	0.98

3.3 非 Darcy 流 β 因子-孔隙度关系

图 6 给出了两种方案的非 Darcy 流 β 因子-孔隙

度曲线。可以看出, 非 Darcy 流 β 因子的绝对值随着孔隙度的减小而增大。方案 1 随着孔隙度的减小, β_1 由负变正, 量级为 $10^{10} \sim 10^{13} \text{ m}^{-1}$ 。方案 2 随着孔隙度的减小, β_2 始终为负值, 量级为 $10^7 \sim 10^{13} \text{ m}^{-1}$ 。与渗透率有类似的特征, 在较大孔隙度下两种方案 β_1 、 β_2 相差较大, 可见与加载历程有关, 而在较小孔隙度下两种方案 β_1 、 β_2 趋于相同量级, 与加载历程无关。

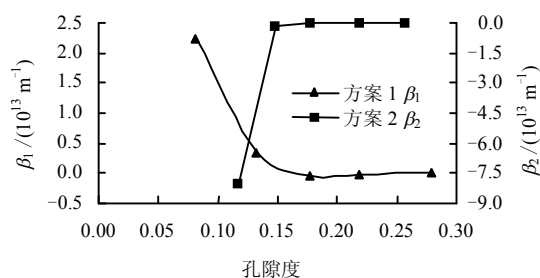


图 6 不同加载条件非 Darcy 流 β 因子-孔隙度曲线
Fig.6 Relations of non-Darcy flow factor β and porosity under different loadings

当渗流达到稳定时, 由式 (3) 可知, 等式左边为渗流液体在破碎煤体中流动的驱动力, 等式右边第 1 项为黏滞阻力, 第 2 项为惯性阻力。方案 1 驱动力在增大, 随着孔隙度的减小, 配径碎煤中的颗粒碎化严重, 细小颗粒被渗流液体冲走, 出现视渗透率大于绝对渗透率的现象, 惯性阻力由负变正, 渗流液体的黏滞阻力由大变小, 配径碎煤的渗透性加强; 方案 2 驱动力不变, 随着孔隙度的减小, 小颗粒充填孔隙空间, 出现视渗透率小于绝对渗透率的现象, 惯性阻力始终为负, 数量级几乎翻一番, 渗流液体的黏滞阻力由小变大, 配径碎煤的渗透性减弱。

非 Darcy 流 β 因子与孔隙度的函数关系如表 3 所示, 两种方案下均可采用三次多项式拟合。多项式前面的系数与加载历程有关。

表 3 非 Darcy 流 β 因子-孔隙度函数关系拟合
Table 3 Fitting function of non-Darcy flow factor β and porosity

方案	三次多项式拟合公式	相关系数
1	$\beta = -1.06 \times 10^{16} \phi^3 + 6.96 \times 10^{15} \phi^2 - 1.49 \times 10^{15} \phi + 1.03 \times 10^{14}$	1.00
2	$\beta = 1.53 \times 10^{17} \phi^3 - 9.50 \times 10^{16} \phi^2 + 1.93 \times 10^{16} \phi - 1.28 \times 10^{15}$	0.98

4 讨 论

本文利用电子万能试验机控制渗透仪活塞的位移, 从而计算配径碎煤的孔隙度; 利用溢流阀及压力表测量渗透压差, 进而计算压力梯度; 利用量筒

测量渗流液体的流量, 进而计算渗流速度。从测量的精确性考虑, 试验存在一定的误差。误差来源主要有: ①由于破碎煤样颗粒直径不同, 装料时颗粒分布具有随机性, 随着渗透仪活塞位移量的增加, 配径碎煤的孔隙结构存在差异; ②利用量筒测量某一时间段内渗流液体的流量时, 若流速较快, 时间记录具有滞后性; 若流速较慢, 读取数据受量筒内残留液体影响, 故量筒测量时的人为因素不可忽略。为了减小误差, 本文采取的措施是增加试验量, 每组试验重复进行 3 次。而量筒测量流量是本试验系统的不足之处, 今后研究中需做进一步市场调研, 选择自动流量记录器, 实时、精确记录流量。

5 结 论

(1) 渗流速度与孔隙度、渗透压差和加载历程有关。渗流速度随着孔隙度的减小而变慢, 方案 1 渗流速度和孔隙度服从幂函数关系, 且渗透压差越大, 渗流速度减小越快; 方案 2 渗流速度与孔隙度服从指数函数关系, 不同渗透压差下的渗流速度变化趋势基本一致。方案 2 比方案 1 的最小渗流速度低一个数量级。

(2) 渗透率随着孔隙度的减小而降低, 方案 1 渗透率和孔隙度可用幂函数拟合, 方案 2 渗透率和孔隙度可用指数函数拟合。孔隙度较大时, 渗透率与加载历程有关; 在较小孔隙度下, 渗透率趋于稳定数量级, 与加载历程无关。

(3) 非 Darcy 流 β 因子的绝对值随着孔隙度的减小而增大, 孔隙度较大时, 非 Darcy 流 β 因子与加载历程有关; 在较小孔隙度下, 非 Darcy 流 β 因子趋于相同数量级, 与加载历程无关。两种方案的非 Darcy 流 β 因子和孔隙度均可采用三次多项式拟合, 多项式前面的系数与加载历程有关。

(4) 随着孔隙度的减小, 方案 1 驱动力在增大, 非 Darcy 流 β 因子由负变正, 即惯性阻力由负变正, 渗流液体的黏滞阻力由大变小, 配径碎煤的渗透性加强; 方案 2 驱动力不变, 非 Darcy 流 β 因子始终为负值, 即惯性阻力始终为负, 渗流液体的黏滞阻力由小变大, 配径碎煤的渗透性减弱。

参 考 文 献

- [1] 周世宁, 鲜学福, 朱旺喜. 煤矿瓦斯灾害防治理论战略研讨[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [2] KOGURE K. Experimental study on permeability of crushed rock[J]. *Memoirs of the Defense Academy, Japan*, 1976, 16(4): 149-154.
- [3] MC CORQUODAL T A, HANNOURA ABDEL-ALIM A,

- SAM NASSER M. Hydraulic conductivity of rock fill[J]. **Journal of Hydraulic Research**, 1978, 16(2): 123—137.
- [4] STEPHENSON D. 堆石工程水利计算[M]. 李开运, 周家苞, 译. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [5] PRADEEP KUMAR G N, VENKATARAMAN P. Non-Darcy converging flow through coarse granular media[J]. **Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division**, 1995, 76: 6—11.
- [6] 徐天有, 张晓宏, 孟向一. 堆石体渗透规律的试验研究[J]. 水利学报, 1998, (增刊 1): 80—83.
- XU Tian-you, ZHANG Xiao-hong, MENG Xiang-yi. Analysis on seepage property of rockfill mass[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1998, (Supp.1): 80—83.
- [7] 邱贤德, 阎宗岭, 姚本军, 等. 堆石体渗透特性的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(2): 6—9.
- QIU Xian-de, YAN Zong-ling, YAO Ben-jun, et al. Effect of particle-size characteristic on the seepage property of rockfill[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2003, 35(2): 6—9.
- [8] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950—954.
- QIU Xian-de, YAN Zong-ling, LIU Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rockfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 950—954.
- [9] 高玉峰, 王勇. 饱和方式和泥岩含量对堆石料渗透系数的影响[J]. 岩土力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2959—2963.
- GAO Yu-feng, WANG Yong. Influences of saturation manners and mudstone contents on seepage coefficient of rockfill[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Supp.1): 2959—2963.
- [10] 李广悦, 丁德馨, 张志军, 等. 松散破碎介质中气体渗流规律试验研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2009, 28(4): 791—798.
- LI Guang-yue, DING De-xin, ZHANG Zhi-jun, et al. Experimental study of laws of gas seepage in loose fragmented medium[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 791—798.
- [11] 丁德馨, 李广悦, 徐文平. 松散破碎介质中液体饱和渗流规律研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 180—184.
- DING De-xin, LI Guang-yue, XU Wen-ping. Regularities for saturated water seepage in loose fragmented medium[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(2): 180—184.
- [12] 李顺才, 陈占清, 缪协兴. 破碎岩体渗流的试验及理论研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(3): 37—43.
- LI Shun-cai, CHEN Zhan-qing, MIAO Xie-xing. Summarization on the experimental and theoretical researches of the vadose in broken lithosome[J]. **Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)**, 2008, 27(3): 37—43.
- [13] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [14] 陈占清, 李顺才, 浦海, 等. 采动岩体蠕变与渗流耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [15] 刘卫群, 缪协兴, 陈占清. 破碎岩石渗透性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 57—1.
- LIU Wei-qun, MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing. A testing method for determining the permeability of overbroken rock[J]. **Journal of Experimental Mechanics**, 2003, 18(1): 57—61.
- [16] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 破碎岩石非 Darcy 渗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 fragmentized rocks[J]. **Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)**, 2003, 23(2): 11—13.
- [17] 黄先伍, 唐平, 缪协兴, 等. 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1385—1388.
- HUANG Xian-wu, TANG Ping, MIAO Xie-xing, et al. Testing study on seepage properties of broken sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(9): 1385—1388.
- [18] 李顺才, 缪协兴, 陈占清, 等. 承压破碎岩石非 Darcy 渗流的渗透特性试验研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 85—92.
- LI Shun-cai, MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing, et al. Experimental study on seepage properties of non-Darcy flow in confined broken rocks[J]. **Engineering Mechanics**, 2008, 25(4): 85—92.
- [19] 马占国, 缪协兴, 李兴华, 等. 破碎页岩渗透特性[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 260—264.
- MA Zhan-guo, MIAO Xie-xing, LI Xing-hua, et al. Permeability of broken shale[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2007, 24(3): 260—264.
- [20] MA Zhan-guo, MIAO Xie-xing, ZHANG Fan, et al. Experimental study into permeability of broken mudstone[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2007, 17(2): 147—151.
- [21] 马占国, 缪协兴, 陈占清, 等. 破碎煤体渗透特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 985—988.
- MA Zhan-guo, MIAO Xie-xing, CHEN Zhan-qing, et al. Experimental study of permeability of broken coal[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 985—988.
- [22] 孔海陵. 煤层变形与瓦斯运移耦合系统动力学研究[博士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [23] 黄伟. 基于流固耦合动力学的矿压显现与瓦斯涌出相关性分析[博士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.