

文章编号: 1000-7598-(2005) 09-1385-04

# 破碎砂岩渗透特性与孔隙率关系的试验研究

黄先伍<sup>1,2</sup>, 唐 平<sup>3</sup>, 缪协兴<sup>1</sup>, 陈占清<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008; 2. 贵州大学 职业技术学院, 贵阳 550001; 3. 湘潭大学 职业技术学院, 湖南 湘潭 411100)

**摘 要:** 利用一种专利装置与 MTS815.02 型岩石力学试验系统, 进行了破碎砂岩的稳态渗透试验, 得到了不同孔隙率下破碎砂岩的渗透率和非 Darcy 流  $\beta$  因子。通过线性回归得到了渗透率、非 Darcy 流  $\beta$  因子与孔隙率之间的关系。认为破碎砂岩的渗透特性主要是由孔隙率决定的, 孔隙率不仅与当前的应力有关, 更取决于加载历史。研究表明, 水在破碎砂岩中的渗流一般不服从 Darcy 定律, 而服从 Forchheimer 关系, 特别是在小孔隙率下, 非 Darcy 性更为突出; 渗透率、非 Darcy 流  $\beta$  因子与孔隙率之间的关系可用幂函数拟合。

**关 键 词:** 破碎砂岩; 渗透特性; 孔隙率; Forchheimer 关系; 非 Darcy 流  $\beta$  因子

**中图分类号:** TU 452 **文献标识码:** A

## Testing study on seepage properties of broken sandstone

HUANG Xian-wu<sup>1,2</sup>, TANG Ping<sup>3</sup>, MIAO Xie-xing<sup>1</sup>, CHEN Zhan-qing<sup>1</sup>

(1. School of Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. The Vocational College, Guizhou University, Guiyang 550001, China; 3. The Vocational-Technical Institute, Xiantan University, Xiantan 411100, China)

**Abstract:** A patent device, which is combined with the MTS815.02 Rock Mechanics Test System, is used to measure the seepage properties of non-Darcy flow in broken sandstone; and the permeability and the non-Darcy flow  $\beta$ -factor are obtained by steady-state seepage method. The relations between both the permeability and the non-Darcy flow  $\beta$ -factor and porous ratio are obtained through linear regressions. It is held that the seepage properties are mainly decided by the porous ratio; and the porous ratio is concerned with not only the current stress, but mainly also the history of loading. The test results show that the seepage flow of water in broken sandstone does not obey the Darcy's law any longer, but obey the Forchheimer's formula; and the characteristic of non-Darcy flow is more remarkable when the rock is under less porous ratio. Both the permeability and the non-Darcy flow  $\beta$ -factor can be fit by power functions of porous ratio.

**Key words:** broken sandstone; seepage properties; porous ratio; Forchheimer's formula; non-Darcy flow  $\beta$ -factor

## 1 引 言

随着煤炭开采不断向深部扩展, 围岩稳定性控制和动力灾害防治的任务更加艰巨, 由此引出许多重大基础性研究课题, 这些课题对岩石物理力学性质的研究提出了更高的要求。岩石渗透特性的研究, 引起了采矿、土木、水利、石油和核能等行业学者的广泛重视。很多学者对裂隙岩石的渗流特性以及岩石在破裂过程中的应力渗流耦合特性进行了试验和数值模拟研究<sup>[1-4]</sup>, 取得了很多成果。破碎岩石的渗透特性也是被关注的问题之一, 人们从颗粒粒径、应力水平等不同的角度进行了深入的研究<sup>[5-9]</sup>, 为工

程应用提供了理论依据。文献[7, 8]研究了不同应力水平下散体岩石的渗流特性, 但未考虑岩石受力历史的影响。由于工程中的堆石体常需要承受高应力碾压和长期的动载作用, 其孔隙率和渗透特性表现出显著的时变特性。例如道床、路基等堆石体的载荷是变化的移动荷载, 并且含有许多随机因素。又如, 煤矿采空区堆积的破碎岩石由于顶板的周期性断裂和大范围刚体运动的影响, 其孔隙率和渗透特性的变化更是极其复杂的动态过程。显然, 破碎岩石的渗透特性与当前应力不存在简单的对应关系。在长期载荷和动载荷作用下, 岩体的渗透特性不仅取决于当前应力, 更取决于加载历史。

收稿日期: 2005-02-28

修改稿收到日期: 2005-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 50490270), 国家自然科学基金重点项目(No. 50134040), 国家杰出青年基金项目(No. 50225414), 博士点基金项目(No. 20010290003)资助。

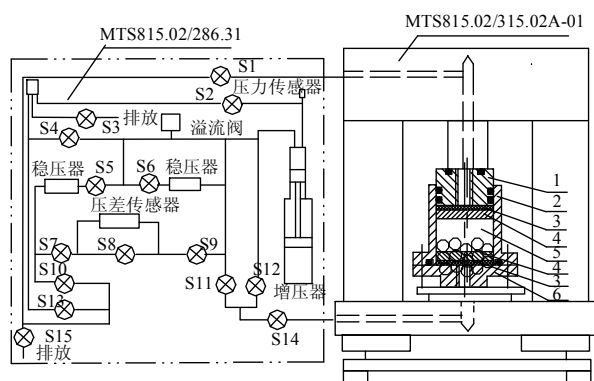
作者简介: 黄先伍, 男, 1962 年生, 博士研究生, 副教授, 从事岩土工程研究和教学工作。E-mail: hxxw1962919@126.com

破碎岩石渗流的另一鲜明特性是不服从 Darcy 定律, 而且孔隙率越小, 非 Darcy 性越明显。

虽然破碎岩石的孔隙率在复杂加载过程中是时变的, 但其渗透特性(渗透率  $k$ 、非 Darcy 流  $\beta$  因子)与孔隙率之间存在一定关系。本文构思了一套破碎岩石非 Darcy 流渗透特性的试验程序和方法, 并建立了渗透特性与孔隙率之间的关系。

## 2 试验系统及方法

利用实用新型国家专利装置——破碎岩石渗透试验附加装置(ZL 02 2 19458.4)与 MTS815.02 型岩石力学试验系统, 构成本文的试验系统, 见图 1<sup>[10]</sup>。破碎岩石渗透试验附加装置由活塞、缸筒、毛毡、透水板、底板、“O”形橡胶密封圈及紧固件等组成, 破碎岩石试样位于缸筒中。



注: 1—活塞; 2—缸筒; 3—毛毡; 4—透水板; 5—岩石试样; 6—底板

图 1 破碎岩石渗透试验系统

Fig.1 Test system for the measurement of seepage properties of broken rock

采用稳态渗透法, 即先将试样加压到某轴向变形值, 在保持该轴向变形不变的条件下, 设定 3~6 个渗流速度, 根据渗流速度和孔隙压力梯度的稳定值, 基于 Forchheimer 关系<sup>[11,12]</sup>, 通过线性回归得到该轴向应变下的渗透特性。

MTS815.02 型岩石力学试验系统的 TestStar II 控制自动记录孔隙压力随时间的变化关系, 从而可以得到孔隙压力梯度的稳定值。当渗流达到稳定状态时, 压力梯度是均匀的。由于破碎岩石上端与大气相通, 下端与 MTS815.02 型岩石力学试验系统的增压器相连, 故孔隙压力梯度为

$$G_p = \frac{p' - p}{h} \quad (1)$$

式中  $p' = 0$  为试样顶部的孔隙压力;  $p$  为试样底部的孔隙压力, 即增压器的输出压力;  $h$  为破碎岩石试样的高度。

渗流速度  $V$  可通过 MTS815.02 孔隙压力系统的增压器活塞速度  $V_1$  计算, 即

$$V = \left( \frac{d}{D} \right)^2 V_1 \quad (2)$$

式中  $d$  为增压器活塞直径;  $D$  为缸筒直径。

根据以上的方法, 测试几个预设轴向变形下的渗透特性, 通过线性回归可得到渗透特性与孔隙率的关系。

孔隙率  $n$  可由破碎岩石的轴向变形  $\Delta h$ 、破碎岩石渗透试验附加装置中缸筒的横截面积  $A$  计算, 即

$$n = 1 - \frac{m}{\rho A (h_0 - \Delta h)} \quad (3)$$

式中  $m$  为试验中装填的破碎岩石的质量;  $\rho$  为岩石颗粒的质量密度;  $h_0$  为试样初始高度。

## 3 试验结果

砂岩岩样采自徐州某煤矿, 密度为  $2.48 \text{ g/cm}^3$ , 单轴抗压强度为  $57.5 \text{ MPa}$ , 孔隙率为  $10.9\%$ , 吸水率为  $2.6\%$ 。试样粒径为  $15 \sim 20 \text{ mm}$ 。

本试验设定 5 级轴向变形值, 分别为 10, 20, 30, 35, 40 mm, 每一轴向变形下, 渗流速度设定为 4 级。在前 4 级轴向变形值下, 增压器活塞速度分别为 10, 20, 30, 40 mm/min。在第 5 级轴向变形值下, 增压器活塞速度分别为 6, 12, 18, 24 mm/min。渗透特性与孔隙率之间用幂函数拟合, 参见图 2 和图 3, 拟合曲线方程为

$$\beta = 0.780 \times 10^9 n^{-3.07} \quad (4)$$

$$k = 5.74 \times 10^{-12} n^{2.72} \quad (5)$$

各级轴向变形下破碎砂岩的渗透特性(回归值)见表 1。

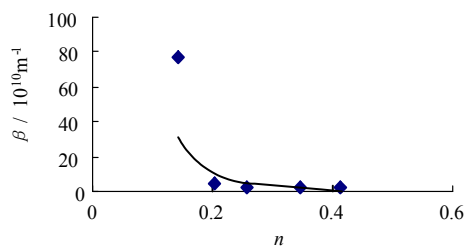


图 2 非 Darcy 流  $\beta$  因子与孔隙率  $n$  的拟合曲线  
Fig.2 Fitting of the non-Darcy flow  $\beta$ -factor and the porous ratio  $n$

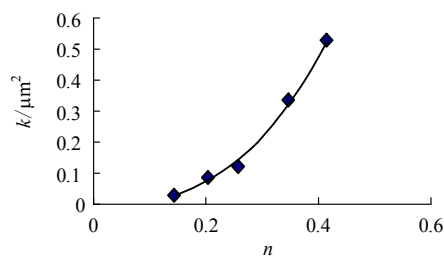


图 3 渗透率  $k$  与孔隙率  $n$  的拟合曲线  
Fig.3 Fitting of the permeability  $k$  and the porous ratio  $n$

表 1 不同孔隙率下的渗透特性  
Table 1 Seepage properties of various porous ratios

轴向变形 $\Delta h/\text{mm}$	试样高度 $h/\text{mm}$	孔隙率 $n$	增压器活塞速度 $V_1/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	渗流速度 $V/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	压力梯度 $G_p/\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	渗透率 $k/10^{-13}\text{m}^2$	非 Darcy 流 $\beta$ 因子 $\beta/10^{10}\text{m}^{-1}$
10	95	0.414	10	$3.16\times10^{-2}$	$-7.37\times10^{-2}$	5.26	2.19
			20	$6.25\times10^{-2}$	$-2.10\times10^{-1}$		
			30	$9.38\times10^{-2}$	$-3.68\times10^{-1}$		
			40	$1.25\times10^{-1}$	$-5.79\times10^{-1}$		
20	85	0.345	10	$3.16\times10^{-2}$	$-1.41\times10^{-1}$	3.33	2.25
			20	$6.25\times10^{-2}$	$-2.59\times10^{-1}$		
			30	$9.38\times10^{-2}$	$-4.71\times10^{-1}$		
			40	$1.25\times10^{-1}$	$-7.29\times10^{-1}$		
30	75	0.257	10	$3.16\times10^{-2}$	$-3.07\times10^{-1}$	1.23	2.55
			20	$6.25\times10^{-2}$	$-6.00\times10^{-1}$		
			30	$9.38\times10^{-2}$	$-9.73\times10^{-1}$		
			40	$1.25\times10^{-1}$	$-1.47\times10^0$		
35	70	0.204	10	$3.16\times10^{-2}$	$-7.29\times10^{-1}$	0.826	4.08
			20	$6.25\times10^{-2}$	$-8.86\times10^{-1}$		
			30	$9.38\times10^{-2}$	$-1.53\times10^0$		
			40	$1.25\times10^{-1}$	$-2.14\times10^0$		
40	65	0.143	6	$1.88\times10^{-2}$	$-1.40\times10^0$	0.291	76.5
			12	$3.75\times10^{-2}$	$-2.38\times10^0$		
			18	$5.63\times10^{-2}$	$-3.85\times10^0$		
			24	$7.50\times10^{-2}$	$-7.14\times10^0$		

4 试验现象及分析

试验中观察到以下现象：

(1) 孔隙压力梯度达到其稳定值前的瞬态过程很短暂，只有 20~30 s。渗流速度较低时，稳定性较差。这是因为在每一级轴向变形下，渗透试验按渗流速度从小到大的顺序进行。由于破碎砂岩在渗透之前已经历压缩破裂过程，一些棱角被压碎，在低速渗流时，一些细小的颗粒随水流产生移动，引起孔隙通道不断变化，渗流稳定性较差。在较高速渗透时，由于经过前几次低速渗透，小颗粒移动到相对稳定的位置，渗流变得相对稳定。图 4 和图 5 分别为轴向变形为 35 mm 和 40 mm 时孔隙压力随时间变化的曲线。

(2) 破碎砂岩渗流不服从 Darcy 定律，而服从 Forchheimer 关系。特别是，在孔隙率较小时，由于孔隙的连通性变弱，渗透通路复杂化，非 Darcy 性更为显著。对渗流速度和对应的压力梯度稳定值按 Darcy 定律拟合，相关系数只有 0.7~0.85，而用 Forchheimer 关系拟合，相关系数达到 0.95 以上。图 6 是轴向变形为 40 mm 时孔隙压力梯度稳定值与渗流速度的拟合曲线，按 Darcy 定律拟合相关系数为 0.850，按 Forchheimer 关系拟合相关系数为 0.968。

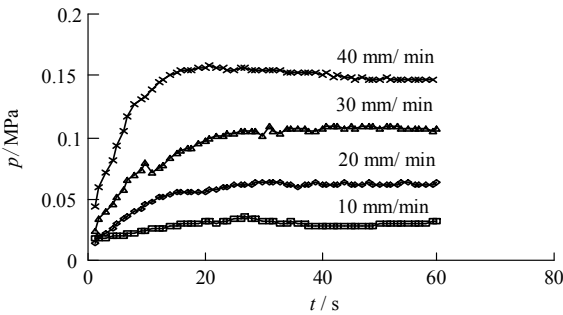


图 4 孔隙压力  $p$  - 时间  $t$  曲线( $\Delta h=35\text{ mm}$ )  
Fig.4 Porous pressure  $p$  vs. time  $t$  curve ( $\Delta h=35\text{ mm}$ )

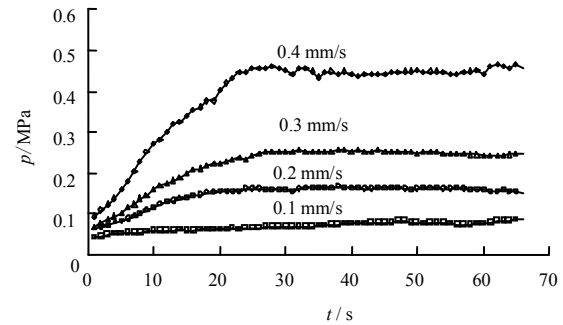


图 5 孔隙压力  $p$  - 时间  $t$  曲线( $\Delta h=40\text{ mm}$ )  
Fig.5 Porous pressure  $p$  vs. time  $t$  curve ( $\Delta h=40\text{ mm}$ )

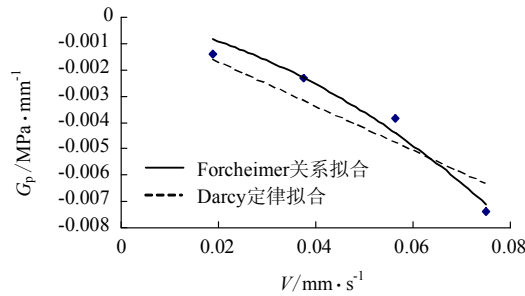


图6 孔隙压力梯度  $G_p$  与渗流速度  $V$  拟合曲线 ( $\Delta h=40$  mm)  
Fig.6 Fitting of the porous pressure gradient  $G_p$  and the seepage velocity  $V$  ( $\Delta h=40$  mm)

(3) 当试样孔隙率大于 0.43 时, 透水板和毛毡的阻力与破碎砂岩的孔隙阻力相比不可忽略, 试验时应将孔隙率控制在 0.42 以下。

(4) 当孔隙率大于 0.3、渗流速度低于 0.01 mm/s 时, 孔隙压力的稳定值很小, 设备的精度不够, 在试验中应适当调整渗流速度。

## 5 结 论

破碎岩石是一种多孔介质, 孔隙形状复杂, 并且分布很不规则, 因此渗流中含有许多不确定因素, 尚需对破碎砂岩渗透特性进行深入研究。特别是复杂动态载荷作用下, 破碎岩石的渗透规律的研究需要从试验系统的设计、试验方法及数据处理技术等多方面进行全方位研究。通过以上分析, 得出以下结论:

(1) 破碎砂岩的渗流一般不符合 Darcy 定律, 而符合 Forchheimer 关系。

(2) 破碎砂岩的渗透率  $k$ 、非 Darcy 流  $\beta$  因子与孔隙率  $n$  之间近似呈幂函数关系。

(3) 本文构造的测试系统能够比较全面地测量破碎岩石非 Darcy 流的渗透特性。通过适当调整试验控制参数, 可使试验数据稳定, 试验精度能满足工程的需要。

(4) 如果在毛毡垫周围加设一钢环, 可以减少毛毡垫阻力对孔隙压力梯度稳定值的影响, 从而可以扩大试验对试样孔隙率的适用范围。

(5) 破碎岩石的渗透特性不仅取决于当前应力, 更取决于加载历史。本文以破碎岩石的孔隙率作为控制非 Darcy 流的渗透特性的主要参数, 并建立它们之间的关系, 较好地反映了破碎岩石渗透特性的变化规律。

## 参 考 文 献

- [1] Kolditz O. Non-linear flow in fractured rock[J]. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2001, 11(5, 6): 547—575.
- [2] Bai M, Meng F, Elsworth D, et al. Analysis of stress-dependent permeability in non-orthogonal flow and deformation field[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1999, 32(3): 195—219.
- [3] 赵阳升, 杨栋, 郑少河等. 三维应力作用下岩石裂隙水渗流物性规律的实验研究[J]. *中国科学(E 辑)*, 1999, 29(1): 82—86.  
ZHAO Yang-sheng, YANG Dong, ZHENG Shao-he. An Experimental Study on the permeability law of rock fracture under 3-D stresses[J]. *Science in China (series E)*, 1999, 29(1): 82—86.
- [4] Tang C A, Tham L G, Yang T H, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage(FSD) in rock failure[J]. *International Journal Rock Mechanics and Mining Science*, 2002, 39: 477—489.
- [5] 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): 80—83.  
XU Tian-you, ZHANG Xiao-hong, MENG Xiang-yi. Analysis on seepage property of rock fill mass[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, s1:80-83.
- [6] 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 rock fill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 950—954.
- [7] 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.
- [8] 马占国. 采空区破碎岩体中水渗流特性研究[硕士学位论文 D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003.
- [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 fragmentized 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.
- [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] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.