

石灰岩应力 - 应变全过程的非 Darcy 流渗透特性

孙明贵¹, 黄先伍^{2, 3}, 李天珍⁴, 雷光宇^{2, 5}, 茅献彪²

(1. 安徽理工大学, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008; 3. 贵州大学, 贵州 贵阳 550002;
4. 徐州工程学院, 江苏 徐州 221008; 5. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076)

摘要: 利用瞬态渗透法测定了石灰岩在应力 - 应变全过程的非 Darcy 流渗透特性, 发现一种新的试验现象, 即在峰后大应变状态下非 Darcy 流 β 因子为负。这一试验现象使得人们可以立足于实验室试验来验证、预测和分析岩石渗流失稳现象和规律。建立了一种瞬态法测定岩石渗透特性的试验系统的动力学模型, 介绍了由孔隙压力差单一时间序列提取非 Darcy 流渗透特性参数(渗透率、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数)的方法, 并对石灰岩标准试样进行了应力 - 应变全过程的渗透试验。研究表明, 无论在峰前还是峰后, 石灰岩的渗流都不服从 Darcy 定律; 当非 Darcy 流 β 因子为正时, 非 Darcy 流的渗透率小于 Darcy 流的渗透率; 当 Darcy 流 β 因子为负时, 由于裂隙的贯通, 孔隙压力迅速衰减, 石灰岩中渗流可能失稳。提出的非 Darcy 流渗透特性的测定方法, 继承了以往实验室试验的成熟技术, 只是在数据处理方面进行了尝试, 既不增加试验成本, 又不加大试验的技术难度, 便于被用户接受。

关键词: 岩石力学; 渗透特性; 非 Darcy 流 β 因子; 加速度系数; 石灰岩

中图分类号: TU 458

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)03 - 0484 - 08

SEEPAGE PROPERTIES OF NON-DARCY FLOW IN COMPLETE FAILURE PROCESS OF LIMESTONE

SUN Ming-gui¹, HUANG Xian-wu^{2, 3}, LI Tian-zhen⁴, LEI Guang-yu^{2, 5}, MAO Xian-biao²

(1. Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 3. Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550002, China; 4. Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 5. Changsha University of Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: A dynamic model of test system is established to study the seepage properties of non-Darcy flow in rock specimen, and seepage properties parameters(permeability, non-Darcy flow β factor, and acceleration coefficient) of limestone specimens are picked up based on the analysis of individual time series of porous pressure gradient. A new phenomenon comes to light in the test process that the non-Darcy flow β factor of the specimen in post-failure stage is less than zero. The discovery of this new phenomenon makes it possible for engineers to verify, forecast, and analyze the instability of seepage flow in rock in laboratory. Test results show that seepage flow in limestone does not obey Darcy's law whether it is in post-failure stage or in ante-failure stage. The permeability of non-Darcy flow is less than that of Darcy's flow when the non-Darcy flow β factor is positive; the seepage flow would be instable when the non-Darcy flow β factor is negative because of the interpenetration of fracture in the specimen. With the help of test results, the mechanism of water inrush in coal mines can be explained more convincingly by the nonlinear dynamics theory, and a new idea is provided to engineers in the control of water

收稿日期: 2004 - 10 - 05; **修回日期:** 2005 - 04 - 11

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50225414); 国家自然科学基金重大项目(50490270); 人事部博士后专项基金项目(2005035676); 江苏省博士后科研发展计划项目; 中国矿业大学科研基金项目(A2004012)

作者简介: 孙明贵(1954 -), 男, 1982年毕业于中国矿业学院工程力学专业, 现任副教授, 主要从事非线性动力学方面的教学与研究工作。E-mail: 8737215779@sina.com。

seepage in surrounding rock strata in coal mines. The tests adopt previously familiar methods, and more efforts are involved only in the data process. It does not increase the test cost, nor does it make the test more difficult. So it is doubtless to be used widely in the near future.

Key words: rock mechanics; seepage properties; non-Darcy flow β factor; acceleration coefficient; limestone

1 引言

岩石孔隙、裂隙中的渗流失稳是煤矿突水、瓦斯突出等动力灾害^[1]的表现形式,其原因在于系统的非线性^[2~4]。岩石等孔隙介质中渗流的非 Darcy 效应研究已经引起普遍关注,并获得许多成果^[5~14]。陈占清^[3]对峰后岩石非 Darcy 渗流系统的分岔行为进行了系统的研究,得到系统的失稳条件之一是 Darcy 流 β 因子为负,但文中的试验结果并未出现 Darcy 流 β 因子为负的情况,其他文献也没有这方面的报道。针对实验室条件下究竟能否得到 Darcy 流 β 因子为负的结果问题,笔者对砂岩、泥岩、页岩、砂质页岩、砂质泥岩和石灰岩等岩石进行了应力-应变全过程的渗透试验,采用瞬态渗透法,利用孔隙压力差单一时间序列得到各种岩石试样的非 Darcy 渗透特性参数(渗透率、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数)。在砂岩、泥岩、页岩、砂质页岩的渗透试验中未发现 Darcy 流 β 因子为负的现象,而石灰岩试样在峰后大应变状态下得到了 Darcy 流 β 因子为负。本文对试验方法和这一新的试验现象作出简单的介绍。

2 试验系统与方法

2.1 提取非 Darcy 流渗透特性的必要性

在一般的水利、岩土工程中,渗流是极其缓慢的流动,通常当作线性、稳态过程来处理。但在采矿工程中,由于岩体受采动影响,其孔隙和裂隙结构发生显著变化,相应地,渗透特性与破坏前相比发生了几个量级的变化,常发生失稳并引发诸如突水和瓦斯突出等动力灾害。这时渗流不再是缓慢的流动,而是非稳态过程。采动岩体渗流的另一特征是非线性,即渗流速度与压力梯度之间不服从 Darcy 定律。

在目前已有文献中,岩石应力-应变全过程的渗透试验只提取渗透率一个指标^[15~19]。试验结果可供一般的水利、岩土工程设计参考,但对于煤矿突

水和瓦斯突出灾害防治技术方案的设计来说,提供的渗透特性就不够全面。为此,笔者探索了一种基于孔隙压力梯度单一时间序列提取 3 个渗透特性参数的方法。根据岩石 3 个渗透特性参数的空间分布及其时变规律,利用采动岩体渗流理论^[20],可判定渗流系统的稳定性,预测突水概率^[3]。关于非 Darcy 流 β 因子的物理意义,孔祥言^[21]已经有详细的论述。加速度系数是反映渗流惯性(即维持原来的速度)的指标,加速度系数越大,其流动状态越难变化。裂纹、裂隙扩展和孔隙率增大的过程,就是惯性减弱的过程,即加速度系数变小的过程,也是稳态流向非稳态流转化、稳定流向不稳定流转化的过程。

2.2 试验系统与方法

对于破裂、破碎岩石,渗透特性测试宜用稳态法^[22~24],而对标准岩样,宜用瞬态法。在 MTS815.02 型岩石力学试验系统上进行岩样瞬态渗透试验的系统原理见图 1。孔隙压力分系统的 2 个稳压器体积均为 B , 压力分别为 p_1 和 p_2 , 岩样的高度和横截面积分别为 H 和 A 。由于初始时刻岩样两端压力不同($p_{10} > p_{20}$),即存在压力梯度 $\xi_0 = \frac{p_{20} - p_{10}}{H}$, 水箱

1 中的液体通过岩样进入水箱 2, 这样水箱 1 的压力不断降低,而水箱 2 的压力不断增大,直到 2 个水箱的压力相等,达到平衡状态。设水箱 1 进入岩样的液体流量为 q , 如果岩样是饱和的,则由岩样进入水箱 2 的液体流量也是 q , 岩样中渗流速度为 $V = \frac{q}{\rho A}$ 。由流体的压缩性,得到

$$\frac{1}{c_f} = \rho \frac{dp_1}{d\rho} \quad (1)$$

式中: c_f 为压缩系数, ρ 为密度。

利用关系 $d\rho = \frac{-qdt}{B}$ 和 $q = \rho AV$, 得到



图 1 瞬态渗透试验系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of transient seepage test system

$$\frac{dp_1}{dt} = -\frac{AV}{c_f B} \tag{2}$$

同理有

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{AV}{c_f B} \tag{3}$$

由式(2)和(3)可以得到

$$\frac{d(p_2 - p_1)}{dt} = 2\frac{AV}{c_f B} \tag{4}$$

或

$$V = \frac{c_f BH}{2A} \frac{d\xi}{dt} \tag{5}$$

式中： ξ 为岩样的压力梯度，且 $\xi = \frac{p_2 - p_1}{H}$ 。对式(5)求导，得到

$$\frac{dV}{dt} = \frac{c_f BH}{2A} \frac{d^2\xi}{dt^2} \tag{6}$$

在许多情形下岩石渗流过程满足 Forchheimer 关系^[3]：

$$\rho c_a \frac{dV}{dt} = -\xi - \frac{\mu}{k} V + \rho\beta V^2 \tag{7}$$

式中： c_a 为加速度系数， μ 为动力黏度， k 为渗透率。

设试验中按等间隔 τ 采集孔隙压差时间序列 $(p_2 - p_1)_{t=i\tau}$ ($i=1, 2, \dots, n$)，这样可以算出压力梯度序列 ξ_i 。根据式(5)与(6)，通过差分，可以得到渗流速度 V 及其变化率 $\eta = \frac{dV}{dt}$ 的时间序列：

$$V_i = \frac{c_f BH}{2A} \frac{\xi_{i+1} - \xi_{i-1}}{2\tau} \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \tag{8}$$

$$\eta_i = \frac{c_f BH}{2A} \frac{\xi_{i+2} - 2\xi_i + \xi_{i-2}}{4\tau^2} \quad (i=2, 3, \dots, n-2) \tag{9}$$

将各时刻的压力梯度值及 V 和 $\eta = \frac{dV}{dt}$ 的差分代入式(7)，直接得到

$$\rho\beta V_i^2 - \frac{\mu}{k} V_i - \rho c_a \eta_i - \xi_i = 0 \quad (i=2, 3, \dots, n-2) \tag{10}$$

构造泛函数

$$\Pi = \sum_{i=2}^{n-2} \left(\rho\beta V_i^2 - \frac{\mu}{k} V_i - \rho c_a \eta_i - \xi_i \right)^2 \tag{11}$$

由泛函数 Π 的极值条件，即

$$\left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i^4 \right) \rho\beta - \left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i^3 \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \eta_i V_i^2 \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \xi_i V_i^2 \right) = 0 \tag{12}$$

$$\left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i^3 \right) \rho\beta - \left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i^2 \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \eta_i V_i \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \xi_i V_i \right) = 0 \tag{13}$$

$$\left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i^2 \eta_i \right) \rho\beta - \left(\sum_{i=2}^{n-2} V_i \eta_i \right) \frac{\mu}{k} - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \eta_i^2 \right) \rho c_a - \left(\sum_{i=2}^{n-2} \xi_i \eta_i \right) = 0 \tag{14}$$

可以解出 $\rho\beta$ ， $\frac{\mu}{k}$ 和 ρc_a 。

有时，通过差分得到的渗流速度 V 及其变化率 $\eta = \frac{dV}{dt}$ 的时间序列不够光滑。在这种情况下，可将孔隙压力梯度 - 时间曲线用多项式拟合，由式(5)和(6)直接求导获得渗流速度 V 及其变化率 $\eta = \frac{dV}{dt}$ 的时间序列。在这种情况下，式(11)~(14)可变为

$$\Pi = \int_0^{t_f} \left(\rho\beta V^2 - \frac{\mu}{k} V - \rho c_a \eta - \xi \right)^2 dt \tag{15}$$

$$\left(\int_0^{t_f} V^4 dt \right) \rho\beta - \left(\int_0^{t_f} V^3 dt \right) \frac{\mu}{k} - \left(\int_0^{t_f} V^2 \eta dt \right) \rho c_a = \int_0^{t_f} V^2 \xi dt \tag{16}$$

$$\left(\int_0^{t_f} V^3 dt \right) \rho\beta - \left(\int_0^{t_f} V^2 dt \right) \frac{\mu}{k} - \left(\int_0^{t_f} V \eta dt \right) \rho c_a = \int_0^{t_f} V \xi dt \tag{17}$$

$$\left(\int_0^{t_f} V^2 \eta dt \right) \rho\beta - \left(\int_0^{t_f} V \eta dt \right) \frac{\mu}{k} - \left(\int_0^{t_f} \eta^2 dt \right) \rho c_a = \int_0^{t_f} \eta \xi dt \tag{18}$$

在岩石应力 - 应变全过程中，预先设置 N 个应变值 $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N$ ($0 < \varepsilon_0 < \dots < \varepsilon_N$) (一般为 8~12 个，可以更多)。按应变增加的方向加载，利用瞬态渗透法进行各应变下的渗透试验。可采集孔隙压差的信号，得到一时间序列 ξ_i ($i=1, 2, \dots, N$)，由这单一的时间序列便可得到 3 个渗透特性参数(渗透率 k 、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数 c_a)。

3 试验结果与现象

由式(7)可以看出，如 $0 < \beta < \frac{\mu^2}{4\rho|\xi|k^2}$ ，则系统

存在平衡态; 当 $\beta > \frac{\mu^2}{4\rho|\xi|k^2}$ 时, 系统不存在平衡态, 系统失稳; 而当 $\beta < 0$ 时, 虽然 $-\xi - \frac{\mu}{k}V + \rho\beta V^2 = 0$ 有 2 个不同的实根, 但这 2 个实根为负。由于渗流不可能从低压处流到高压处, 故不存在平衡态。此时, 系统也失稳。关于渗流系统稳定性和分岔的讨论详见文[3]。一般说来, 当岩样在高围压作用下, 孔隙随轴向载荷的增大而单调减小, 渗透的瞬态过程极其短暂, 很快达到平衡态, 这就是 β 为正的情况。而在低围压下, 岩石会发生诸如劈裂、剪切等破坏, 裂隙的扩展和贯穿使渗流路径通畅, 在不变的压力梯度下便会使渗流速度连续增长, 而没有平衡状态。如果水源有限, 则会使压力梯度急剧减小, 这就是 β 为负的情况。

3.1 试验结果

对采自安徽淮南的石灰岩试样进行了应力-应变全过程的瞬态渗透试验。岩样高 $H = 99.2$ mm, 截面直径 $d = 49.5$ mm, 围压 $p_c = 2.50$ MPa。渗流液体为水, 其密度为 $\rho = 1\ 000$ kg/m³, 动力黏度为 $\mu = 1.01 \times 10^{-3}$ Pa·s, 压缩系数为 $c_f = 0.556 \times$

10^{-9} Pa⁻¹。MTS815.02 型岩石力学试验系统中, 孔隙压力分系统的稳压器容积 $B = 0.332 \times 10^{-6}$ m³。根据试验采集的孔隙压差时间序列计算出非 Darcy 流的渗透特性参数(k, β, c_a)见表 1 和图 2。这里孔隙压力梯度与时间的关系用多项式拟合出于三方面考虑: 一是用多项式关系比用曲线表示节省篇幅; 二是用差分计算数据跳动大, 用多项式拟合可使数据光滑; 三是试验数据用多项式拟合相关性可达 0.99 以上。为了便于与 Darcy 流比较, 表 1 中同时给出了 Darcy 流的渗透率 k_D 。

从表 1 可以看到, 在峰后大应变情况下(本试样为 $\varepsilon = 0.018$ 和 $\varepsilon = 0.020$), 非 Darcy 流 β 因子为负值, 这说明在实验室条件下可以验证、分析甚至预测渗流失稳现象。

3.2 试验现象

在石灰岩试样应力-应变全过程的渗透试验中, 发现以下现象:

(1) 无论是峰前还是峰后, 石灰岩中渗流都不服从 Darcy 定律

图 3(a)是岩样在峰前某应变状态(表 1 中序号为

表 1 石灰岩应力-应变全过程的渗透特性
Table 1 Seepage properties of limestone in the complete failure process

序号	轴向应变	轴向应力 /MPa	孔隙压力梯度拟合曲线	Darcy 流 k_D/m^2	非 Darcy 流		
					k/m^2	β/m^{-1}	c_a
1	0.003 0	14.6	$\xi = 7.62 \times 10^{-6}t^4 - 1.46 \times 10^{-3}t^3 + 5.78 \times 10^{-2}t^2 + 3.57t - 1.41 \times 10^4$	6.75×10^{-19}	3.68×10^{-19}	1.05×10^{23}	1.03×10^{12}
2	0.005 0	33.7	$\xi = -2.53 \times 10^{-6}t^4 + 7.50 \times 10^{-4}t^3 - 9.41 \times 10^{-2}t^2 + 8.11t - 1.38 \times 10^4$	1.29×10^{-18}	6.53×10^{-19}	9.32×10^{21}	3.59×10^{13}
3	0.006 0	58.6	$\xi = -9.35 \times 10^{-6}t^4 + 2.44 \times 10^{-4}t^3 - 2.39 \times 10^{-1}t^2 + 1.27t - 1.39 \times 10^4$	1.26×10^{-18}	5.73×10^{-19}	1.30×10^{22}	2.11×10^{13}
4	0.007 5	92.0	$\xi = -1.23 \times 10^{-5}t^4 + 3.40 \times 10^{-3}t^3 - 3.64 \times 10^{-1}t^2 + 2.39 \times 10^1t - 1.38 \times 10^4$	3.28×10^{-18}	1.82×10^{-18}	1.89×10^{21}	7.49×10^{12}
5	0.008 0	128.0	$\xi = 6.14 \times 10^{-6}t^4 + 6.49 \times 10^{-5}t^3 - 2.43 \times 10^{-1}t^2 + 3.11 \times 10^1t - 1.37 \times 10^4$	4.94×10^{-18}	1.72×10^{-18}	2.65×10^{21}	8.30×10^{12}
6	0.009 0	158.0	$\xi = -2.49 \times 10^{-5}t^4 + 6.38 \times 10^{-3}t^3 - 6.14 \times 10^{-1}t^2 + 3.55 \times 10^1t - 1.39 \times 10^4$	4.82×10^{-18}	2.84×10^{-18}	9.58×10^{20}	3.50×10^{12}
7	0.012 0	52.5	$\xi = -5.72 \times 10^{-4}t^4 + 1.44 \times 10^{-1}t^3 - 1.30 \times 10^1t^2 + 5.06 \times 10^2t - 7.64 \times 10^3$	2.01×10^{-16}	4.01×10^{-18}	7.97×10^{19}	1.04×10^{12}
8	0.015 0	47.7	$\xi = -7.05 \times 10^{-4}t^4 + 1.69 \times 10^{-1}t^3 - 1.42 \times 10^1t^2 + 4.92 \times 10^2t - 6.08 \times 10^3$	2.25×10^{-16}	1.62×10^{-17}	3.08×10^{19}	2.20×10^9
9	0.018 0	46.4	$\xi = -6.35 \times 10^{-4}t^4 + 1.49 \times 10^{-1}t^3 - 1.22 \times 10^1t^2 + 4.03 \times 10^2t - 4.50 \times 10^3$	2.53×10^{-16}	8.03×10^{-16}	-8.38×10^{17}	6.22×10^9
10	0.020 0	42.9	$\xi = -6.56 \times 10^{-4}t^4 + 1.53 \times 10^{-1}t^3 - 1.24 \times 10^1t^2 + 4.03 \times 10^2t - 4.41 \times 10^3$	2.62×10^{-16}	8.42×10^{-16}	-8.61×10^{17}	6.35×10^9

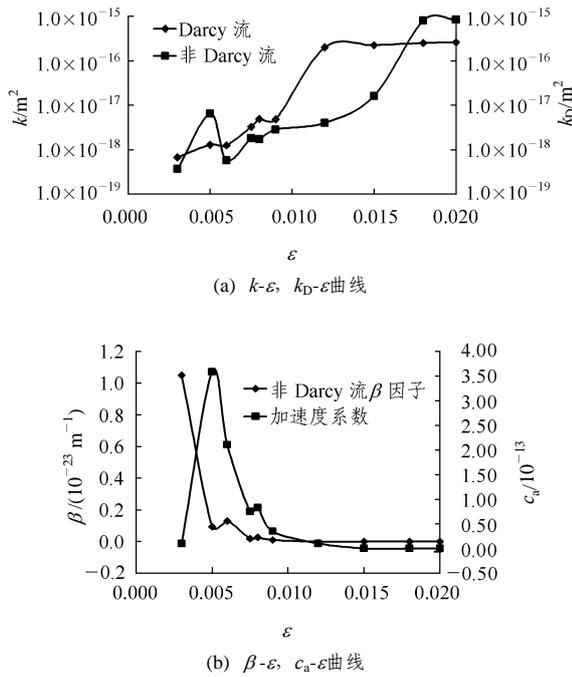


图2 石灰岩应力-应变全过程的渗透特性

Fig.2 Seepage properties of limestone in the complete failure process

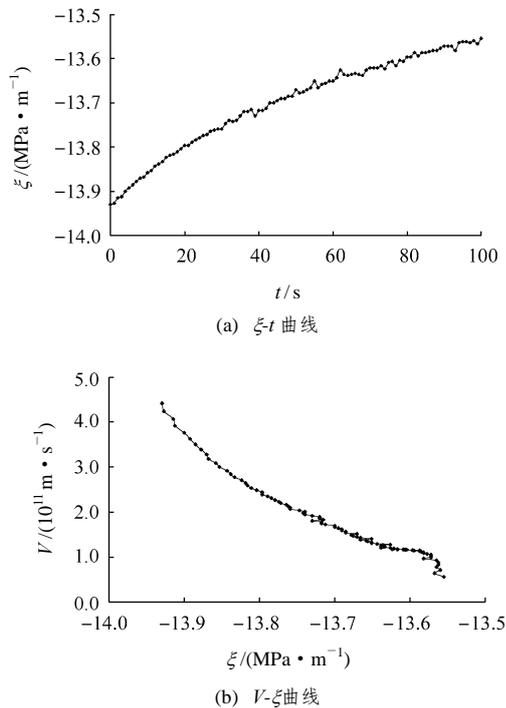


图3 石灰岩峰前应力状态下渗透过程中孔隙压力梯度与渗流速度关系

Fig.3 Seepage velocity and pressure gradient in the seepage process of limestone specimen in ante-failure state

2)下, 渗透过程中孔隙压力梯度随时间变化的曲线, 这条曲线可用6次多项式很好地拟合, 拟合方程为

$$\xi = -1.92 \times 10^{-6} t^6 + 5.97 \times 10^{-4} t^5 - 7.31 \times 10^{-2} t^4 + 4.68 t^3 - 197 t^2 + 9.28 \times 10^3 t - 1.39 \times 10^7$$

根据式(5), 可以得到渗流速度为

$$V = \frac{c_t BH}{2A} \frac{d\xi}{dt} = 4.76 \times 10^{-15} (-1.15 \times 10^{-5} t^5 + 2.99 \times 10^{-3} t^4 - 2.92 \times 10^{-1} t^3 + 14.0 t^2 - 394 t + 9.28 \times 10^3)$$

图3(b)给出了渗透过程中孔隙压力梯度-渗流速度曲线。显然, 孔隙压力梯度与渗流速度之间不呈直线关系, 说明峰前应变状态下, 石灰岩中渗流不服从Darcy定律。

在峰后应变状态下, 也选取一点(表1中序号为10), 根据试验数据拟合出孔隙压力梯度和渗流速度的变化趋势, 其表达式分别为

$$\xi = -4.46 \times 10^{-4} t^6 + 1.51 \times 10^{-1} t^5 - 2.02 \times 10^1 t^4 + 1.35 \times 10^3 t^3 - 4.69 \times 10^4 t^2 + 8.03 \times 10^5 t - 5.49 \times 10^6$$

$$V = \frac{c_t BH}{2A} \frac{d\xi}{dt} = 4.76 \times 10^{-15} (-2.67 \times 10^{-3} t^5 + 7.55 \times 10^{-1} t^4 - 8.08 \times 10^1 t^3 + 4.05 \times 10^3 t^2 - 9.38 \times 10^4 t + 8.03 \times 10^5)$$

图4给出了渗透过程中, 孔隙压力梯度-时间曲线和孔隙压力梯度-渗流速度曲线。由图4可见,

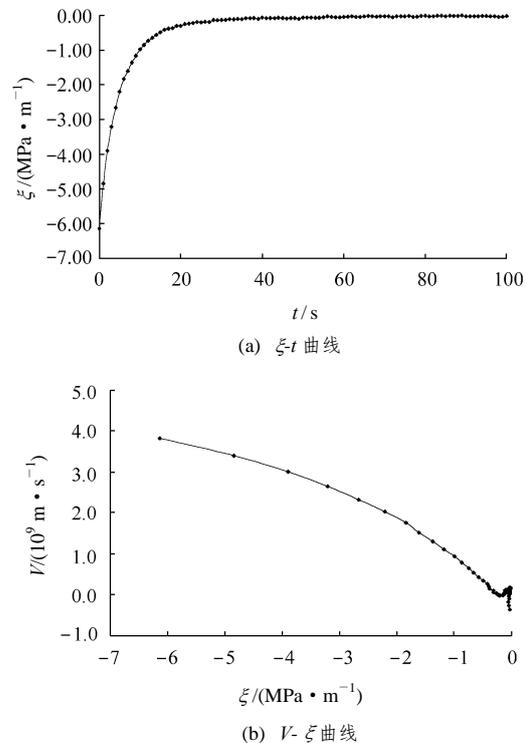


图4 石灰岩峰后应力状态下渗透过程中孔隙压力梯度与渗流速度

Fig.4 Seepage velocity and pressure gradient of limestone specimen in the seepage process under post-failure state

孔隙压力梯度-渗流速度曲线与直线也存在差异。由此可说明,峰后应变状态下,石灰岩中渗流也不服从 Darcy 定律,只是非 Darcy 效应没有峰前显著。

(2) 当应变较大时,非 Darcy 流 β 因子可能为负

从表 1 可以看到,在峰后大应变情况下(本试样为 $\varepsilon = 0.018$ 和 $\varepsilon = 0.020$),非 Darcy 流 β 因子为负值,这是由于裂隙的贯通,岩样两端的压力迅速达到平衡所致。如果保持两端压差不变,则渗流速度一直增加,没有稳定值。基于这一现象,可以在实验室条件下验证、分析甚至预测渗流失稳现象,从而节省现场试验的巨额费用。

(3) 当非 Darcy 流 β 因子为负时,非 Darcy 流的渗透率比 Darcy 流的渗透率小,即 $k < k_D$,这是由于岩样渗透过程中,渗流加速度与压力梯度符号相同的原因。由式(7)可得

$$k = \frac{\mu V}{-\xi - \rho c_a \frac{dV}{dt} + \rho \beta V^2} \quad (19)$$

由于孔隙压差随时减少,渗流加速度为负,令孔隙压力梯度恒为负,即

$$0 < -\xi < -\xi - \rho c_a \frac{dV}{dt} + \rho \beta V^2$$

当 $\beta < 0$ 时, $-\rho c_a \frac{dV}{dt}$ 和 $\rho \beta V^2$ 反号,互相抵消,

流动近似于稳态 Darcy 渗流。故对于本试样,峰后的非 Darcy 效应没有峰前显著。

4 分析

4.1 试验误差分析

在本文建立的力学模型中,质量方程式(5)与 Forchheimer 关系式(7)构成封闭的方程组,因而是完整的动力学模型。但这一模型存在以下几方面的误差:

(1) 忽略了岩样中流体的压缩性和岩石的孔隙压缩性

由于岩样中孔隙的体积与稳压器容积相比可以忽略,从而保证了岩样中流体的压缩性不会对试验结果造成显著的误差。孔隙度变化是岩样渗透变化的决定因素,所以孔隙压缩性不可忽略。但是岩样中的孔隙和裂隙变化主要是由轴向载荷和围压决定的,在各个试验点,由于载荷和围压保持不变,岩样的孔隙度可视为均匀的,这样可以将动力学模型大大简化。

(2) 忽略了管路的变形

MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力系统中,导管壁不是很厚,在流体压力作用下,会发生变形,导管的膨胀会引起孔隙压力降低。这一误差的大小及消除这一误差影响的措施,有待于进一步的研究。

(3) 忽略了管路的泄漏

事实上,MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力系统的密封性并不十分理想。但是由于渗透试验持续时间只有 100 s,这种误差对试验结果不会构成显著的影响。

(4) 压差传感器的精度

MTS815.02 型岩石力学试验系统的孔隙压力系统中孔隙压力差的传感器精度为 1~10 kPa,在一般试验条件下,精度能满足用户的要求。

4.2 发现试验现象的工程意义分析

在以前的岩样渗透过程的动力学模型中,没有加速度系数和非 Darcy 流 β 因子,即认为渗流服从 Darcy 定律:

$$\xi = -\frac{\mu}{k_D} V \quad (20)$$

由式(20)与(5)构成封闭的方程组,从而可以得到

$$\frac{d\xi}{dt} = -2 \frac{A k_D}{c_f B H \mu} \xi \quad (21)$$

设试验中按等间隔 τ 采样,采样的总次数为 n ,采样终了时刻 $t_f = n\tau$ 时的孔隙压力梯度为 ξ_f ,对式(21)积分,可得

$$\ln \frac{\xi_0}{\xi_f} = 2 \frac{A k_D t_f}{c_f B H \mu} \quad (22)$$

这样,由式(22)可以计算出岩样的渗透率,即

$$k_D = \frac{c_f B H \mu}{2 t_f A} \ln \frac{\xi_0}{\xi_f} = \frac{c_f B H \mu}{2 t_f A} \ln \frac{p_{10} - p_{20}}{p_{1f} - p_{2f}} \quad (23)$$

式(23)就是目前在 MTS815 系列岩石力学试验系统上进行岩样应力-应变全过程瞬态渗透试验中计算岩样渗透率的公式^[15~19]。这种方法只能得到唯一的渗透特性参数,即渗透率 k_D 。

本文采用的模型既考虑了渗流的动态特性(加速度系数),又考虑了渗流的非线性(非 Darcy 流 β 因子),故可以得到 3 个渗透特性参数(渗透率 k 、加速度系数 c_a 和非 Darcy 流 β 因子)。因此,不仅为实验室试验(实验室试验比现场试验成本低得多)研究岩石渗流的非线性动力学运动规律提供技术手段,也

为理论研究和数值模拟提供了必要的参量。因此，本文的研究具有广阔的工程应用前景。

众所周知，Darcy 定律描述的是稳态的、线性的渗流过程，而在瞬态渗透试验中，由于孔隙压力是随时衰减的，渗流是瞬态过程。因此，基于 Darcy 定律的力学模型是存在误差的。在水利、工业与民用建筑、石油和天然气开采等工程中，渗流是一个极其缓慢的、稳态的过程，可以用 Darcy 定律描述。但在煤矿和金属矿开采中，渗流可能导致失稳并引起重大动力灾害，诸如煤矿突水和瓦斯突出等渗流失稳现象，若从线性、稳态的 Darcy 流来分析存在许多障碍，其中最大的障碍是不能反映渗流的失稳过程。根据 Darcy 定律，渗流速度与孔隙压力梯度成正比，孔隙压力梯度的微小变化不能引起渗流速度的急剧变化。线性系统的动力学响应连续地依赖于系统的控制参量，控制参量的变化不能引起系统动力学行为的突变。

本文提出的非 Darcy 流渗透特性的测定方法，继承了以往实验室试验的成熟技术，只是在数据处理方面进行了尝试，既不增加试验成本，又不加大试验的技术难度，便于被用户接受。

4.3 采动岩体渗流失稳的机制简析

由于液体只能由高压流向低压，故渗流速度的方向与孔隙压力梯度的方向相反，即 $-\xi$ 与 V 同号，不妨假设都为正号，则当 $\left(\frac{\mu}{k}\right)^2 + 4\rho\beta\xi < 0$ ，不存在平衡态，系统会发生失稳。

从物理上讲，渗流失稳是流固耦合作用发展到一定阶段和一定程度的结果，岩石变形改变了其孔隙和裂隙结构，从而改变了其渗透特性，渗流液体(气体)的压力对固体的变形也有显著影响。同时，液体(气体)的流动对渗流通道也有正反馈作用。这两方面作用的结果可能导致岩石对流体阻隔作用丧失，从而发生渗流失稳。

5 结 论

煤矿突水和瓦斯突出等动力灾害表现为渗流失稳，渗流系统的失稳取决于煤矿围岩的渗透特性。本文提出的瞬态法测定岩石非 Darcy 流的渗透特性方法，为研究煤矿突水和瓦斯突出等动力灾害提供了简便的试验手段。根据以上研究，可得出以下结论：

(1) 在峰后大应变状态下，石灰岩的非 Darcy

流 β 因子可能为负。这一试验现象使得人们可以立足于实验室试验来验证、预测和分析岩石渗流失稳现象和规律。

(2) 由孔隙压力差单一时间序列提取非 Darcy 流渗透特性参数(渗透率 k 、非 Darcy 流 β 因子和加速度系数 c_a)，继承了以往实验室试验的成熟技术，既不增加试验成本，又不加大试验的技术难度，便于被用户接受。

(3) 无论在峰前还是峰后，石灰岩的渗流都不服从 Darcy 定律。

(4) 当非 Darcy 流 β 因子为正时，非 Darcy 流的渗透率小于 Darcy 流的渗透率。

(5) 在峰后大应变状态下，非 Darcy 流 β 因子和加速度系数的量值比峰前减少了 99% 以上，并且在最后 2 个应变水平下，非 Darcy 流 β 因子为负值，试验中表现为孔隙压力梯度急速降低。实际上，非 Darcy 流 β 因子为负值时，渗流失稳。

参考文献(References):

[1] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.(Jiang Chenglin, Yu Qixiang. The Spherical Shell Losing Stability Mechanism on Coal and Gas Outburst and the Protection Approaches[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998.(in Chinese))

[2] 唐平, 孙明贵. 岩石渗流系统动力学响应及分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(2): 115 - 117.(Tang Ping, Sun Minggui. Dynamic response of non-Darcy flow system and its analysis[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2003, 20(2): 115 - 117.(in Chinese))

[3] 陈占清. 峰后岩石非 Darcy 渗流系统的分岔行为研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003.(Chen Zhanqing. Bifurcation of dynamic system of non-Darcy flow in post-failure rock[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2003.(in Chinese))

[4] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分岔行为研究[J]. 力学学报, 2003, 35(6): 660 - 667.(Miao Xiexing, Chen Zhanqing, Mao Xianbiao, et al. The bifurcation of non-Darcy flow in post-failure rock[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(6): 660 - 667.(in Chinese))

[5] Civan F, Evans R D. Determination of non-Darcy flow parameters using a differential formulation of the Forchheimer equation[A]. In: Proceedings of the Gas Technology Symposium[C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 419 - 429.

[6] Thauvin F, Mohanty K K. Modeling of non-Darcy flow through

- porous media[A]. In: Proceedings of SPE Symposium on Reservoir Simulation[C]. [s. l.]: [s. n.], 1997. 313 - 314.
- [7] Erarslan S, Ayan C, Lee W J. Non-Darcy flow behavior in partially penetrating gas well[A]. In: Proceedings of the Middle East Oil Show[C]. [s. l.]: [s. n.], 1991. 543 - 557.
- [8] Ummuayponwivat S, Ozkan E, Pearson C M, et al. Effect of non-Darcy flow on interpretation of transient response of hydraulically fractured wells[A]. In: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition DELTA[C]. [s. l.]: [s. n.], 2000. 577 - 589.
- [9] Phanikumar M S, Mahajan R L. Non-Darcy natural convection in high porosity metal foams[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(18): 3 781 - 3 793.
- [10] 陈代询, 王章瑞. 致密介质中低速渗流气体的非达西现象[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(增1): 25 - 27.(Chen Daixun, Wang Zhangrui. Non-Darcy phenomena of gas flow at low velocity in tight porous media[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2000, 23(Supp.1): 25 - 27.(in Chinese))
- [11] 肖鲁川, 甄力, 郑岩. 特低渗透储层非达西渗流特征研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 27 - 30.(Xiao Luchuan, Zhen Li, Zheng Yan. Non-Darcy seepage flow characteristic in ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Oil Field Development in Daqing, 2000, 19(5): 27 - 30.(in Chinese))
- [12] 陈永敏, 周娟, 刘文香, 等. 低速非Darcy渗流现象的试验论证[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(增1): 59 - 61.(Chen Yongmin, Zhou Juan, Liu Wenxiang, et al. Experimental demonstration of the non-Darcy phenomenon during low velocity flow through porous media[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science), 2000, 23(Supp.1): 59 - 61.(in Chinese))
- [13] 贾振岐, 王延峰, 付俊林, 等. 低速非达西渗流特征及影响因素[J]. 大庆石油学院学报, 2001, 25(3): 73 - 76.(Jia Zhenqi, Wang Yanfeng, Fu Junlin, et al. Characteristics of non-Darcy percolation and influencing factors under the condition of low permeability and low velocity[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2001, 25(3): 73 - 76.(in Chinese))
- [14] 贾永禄, 谭雷军, 冯曦, 等. 低速非达西渗流中气井、油井试井分析方程的统一[J]. 天然气工业, 2000, 20(3): 70 - 72.(Jia Yonglu, Tan Leijun, Feng Xi, et al. In low-velocity non-Darcy percolation flow the unity of well test analysis equations used for gas and oil wells respectively[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(3): 70 - 72.(in Chinese))
- [15] MTS Systems Corporation. Model 815 Rock and Concrete Mechanics Test System Technical Description(Version 5)[M]. Minisuda: MTS Systems Corporation, 1999.
- [16] Li S P, Li Y S, Wu Z Y, et al. Permeability-strain equations corresponding to the complete stress-strain path of Yin Zhuang sandstone[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1994, 31(4): 383 - 391.
- [17] 李世平, 李玉寿, 吴振业, 等. 岩石全应力-应变过程对应的渗透率与应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 13 - 19.(Li Shiping, Li Yushou, Wu Zhenye, et al. Permeability-strain equation according to the total process of stress-strain of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(2): 13 - 19.(in Chinese))
- [18] 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.(in Chinese))
- [19] 王金安, 彭苏萍, 孟召平. 岩石三轴全应力-应变过程中的渗透规律[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(6): 489 - 491.(Wang Jin'an, Peng Suping, Meng Zhaoping. Permeability rule in full strain-stress process of rock under triaxial compression[J]. Journal of University of Science and Technology of Beijing, 2001, 23(6): 489 - 491.(in Chinese))
- [20] 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, 2004.(Miao Xiexing, Liu Weiqun, Chen Zhanqing. Dynamics of Systems of Seepage Flow in Surrounding Rock Affected by Mining[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [21] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 8 - 51.(Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluid in Porous Media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999. 8 - 51.(in Chinese))
- [22] 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 Minggui, Li Tianzhen, Huang Xianwu, et al. Penetrating properties of non-Darcy flow in fragmented rocks[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2003, 23(2): 11 - 13.(in Chinese))
- [23] 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, 19(4): 108 - 110.(Liu Yuqing, Li Yushou, Sun Minggui. A new method for the measurement of seepage properties of bulky rock[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(4): 108 - 110.(in Chinese))
- [24] 李天珍, 李玉寿, 马占国. 破裂岩石非Darcy渗流的试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 132 - 135.(Li Tianzhen, Li Yushou, Ma Zhanguo. Testing study on non-Darcy seepage flow in fractured rocks[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 132 - 135.(in Chinese))