

破碎岩体中气体渗流的非线性动力学研究

李顺才^{1,2}, 陈占清², 缪协兴², 茅献彪²

(1. 徐州师范大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在采矿和岩土工程中, 破碎岩体中的渗流具有非线性、非稳态及参量时变等特点, 外界扰动下渗流参量的渐变易引起渗流系统动力学响应的突变, 引发突水及气体突出等动力学灾害。采用非线性分岔及突变理论研究破碎岩体中气体渗流失稳的动力学机制。建立气体一维非稳态、非达西渗流的非线性动力学模型, 给出量纲一化后的速度平衡态解图, 得到渗流平衡状态的孔隙压力、渗流速度的分布规律, 即平衡时沿着渗流方向, 各点的量纲一孔隙压力与渗流速度的乘积为一常量, 且压力的平方呈线性下降。通过低松弛迭代法给出渗流系统相应于不同渗流参数时的动力学响应。研究结果表明, 破碎岩体渗流动力系统存在鞍结分岔, 分岔点处破碎岩体的颗粒棱角破碎现象相当显著, 渗流处于临界稳定状态, 此时对应于任意小的扰动系统都会发生折叠突变, 引发突出动力灾害。

关键词: 岩石力学; 破碎岩体; 非达西气体渗流; 非线性动力学; 鞍结分岔; 折叠突变

中图分类号: TU 45; O 357.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)07 - 1372 - 09

NONLINEAR DYNAMIC STUDY ON GAS FLOW IN BROKEN ROCK MASS

LI Shuncai^{1,2}, CHEN Zhanqing², MIAO Xiexing², MAO Xianbiao²

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*

2. College of Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: In fields of coal mining, geotechnical engineering, the flow in broken rock is nonlinear, instable and time-varying for seepage parameters. Under the external disturbance, the gradual variation of the seepage parameter is apt to result in the catastrophe of the dynamic responses of the flow system and induces disasters such as water inrush and gas outburst. The study of the flow stability on the broken rock mass induced by mining is a basic subject of a series of important research topics such as controlling the stability of the surrounding rock, preventing the outburst disaster, exploiting and using the underground resources. The theories of bifurcation and catastrophe in nonlinear science are used to study the dynamic mechanism of instability of gas flow in broken rock. The nonlinear dynamical equations of one-dimensional non-Darcy and unsteady gas flow in broken rock are established. The solution diagram of dimensionless velocity under steady-state is given and the distribution laws along the direction of flow are obtained for the pore pressure and the steady-state flow velocity; namely, along the flow direction, the product of the pore pressure and the flow velocity of the dimensionless steady-states is a constant and the square of the pore pressure descends linearly. With low relaxation iteration, the dynamical responses corresponding to the different flow parameters of seepage system are also given. The results indicate that there is a saddle-node bifurcation in dynamic system of flow in broken rock; and at the bifurcation point, the

收稿日期: 2006 - 09 - 21; **修回日期:** 2007 - 04 - 09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50574090); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221502); 教育部重点项目(105024); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2007029)

作者简介: 李顺才(1969 -), 女, 博士, 1991年毕业于重庆大学工程力学专业, 现任副教授, 主要从事工程力学及破碎岩体渗流非线性动力学等方面的教学与研究工作。E-mail: zslsc@263.net

breaking of edges and corners of rock grains is remarkable; thus an arbitrary weak perturbing at this point may result in a fold catastrophe of flow system and induce some dynamic disasters such as gas outburst, etc..

Key words: rock mechanics; broken rock; non-Darcy gas flow; nonlinear dynamics; saddle-node bifurcation; fold catastrophe

1 引言

煤矿开采中常会遇到破碎岩体中的气体渗流问题, 如煤层破碎开发煤层气、采动诱发瓦斯突出、采空区或破碎煤岩中实施瓦斯抽放、采空区注氮灭火等^[1]。其中, 瓦斯突出是严重威胁煤矿安全生产的主要灾害之一, 据 2005 年最新统计, 全国煤矿建国以来一次死亡百人以上事故中, 瓦斯事故占事故总数的 90.91%, 死亡人数占百人以上事故总人数的 93.52%^[2]。在气体突出事故中, 我国煤矿 99% 是瓦斯突出, 此外, 还发生过二氧化碳气体突出及瓦斯和二氧化碳气体的混合突出事故等。破碎煤岩体是瓦斯等气体聚集和运移的主要场所, 如综放采空区瓦斯最高浓度可高出工作面瓦斯浓度几十倍, 该区域的瓦斯渗透性和移动规律对保证工作面生产安全至关重要。因此, 采动破碎岩体渗流行为的研究是煤矿围岩稳定性控制、突出灾害防治、地下资源开发及利用等一系列重大课题的基础研究课题, 对于促进煤矿安全生产、实现煤炭资源的绿色开采和煤炭工业的可持续发展有着重要的理论意义和工程实际意义。

对于完整和破裂岩石中的渗流, 国内外学者^[3-12]已进行了较多的试验和理论研究, 如 M. Armenta 和 A. K. Wojtanowicz^[9]指出对于储气层整个储层都要考虑气体渗流的非达西效应, 否则会过高估计气井的产能; 孙明贵等^[6]利用瞬态渗透法测定了石灰岩破裂前后全过程的非达西流渗透特性, 发现峰后大应变状态下非达西流 β 因子出现负值现象。缪协兴等^[12]用谱截断法研究了峰后岩石非达西渗流系统的分岔行为。但破碎岩体特别是承压破碎岩体的渗透试验及渗流失稳理论的研究则较少。在试验方面, 刘卫群等^[13]和余为^[14]为了测试采矿工程中松散破碎岩体的气体渗透特性, 设计了与 MTS815.02 岩石力学伺服机配套的气体渗透仪和测试系统; 通过对几组破碎砂岩岩样氮气渗透性能的测试, 得出破碎砂岩气体非达西渗流的渗透率随压力和粒径的变化规律。李顺才^[15]通过破碎砂岩、煤矸石和灰岩

等岩石在不同轴向位移(或不同孔隙率)下的水渗流试验, 得到以下几个主要结论:

(1) 渗流稳定时压力梯度与渗流速度之间可用二次多项式拟合: $\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{k}v - bv^2$, 其中二次项 bv^2 是对线性项 $\frac{\mu}{k}v$ 的修正, 系数 b 为达西流偏离因子, v 为渗流速度。

(2) 随着孔隙率的减少, 渗透率 k 呈现整体下降的趋势, 而达西流偏离因子 b 的绝对值呈现整体上升的趋势, 但渗透率 - 孔隙率曲线和达西流偏离因子 - 孔隙率曲线出现局部波折, 且粒径越大, 这种波折越剧烈。

(3) 由试验得到的不同粒径碎石的渗透率 k 的量级为 $(10^{-16} \sim 10^{-12}) \text{ m}^2$, 达西流偏离因子 b 的量级为 $(10^{12} \sim 10^{15}) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-4}$ 。

(4) b 存在正负 2 种可能性。当颗粒的破碎细化现象严重时, b 出现负值的可能性较大, 此时破碎岩石的渗流会出现视渗透率大于其绝对渗透率的现象。在理论方面, 黄伟等^[8]从 Forcheimer 型非达西渗流系统平衡态存在性的角度出发, 用概率语言描述煤矿瓦斯的突出行为, 认为瓦斯突出是否发生具有随机性, 随着煤体应变的增加, 瓦斯突出发生的概率迅速增加。

由于破碎岩体中的渗流具有非线性、非稳态、参量时变等特点^[1], 渗流参量的渐变往往会引起渗流系统动力学响应的突变, 但目前关于气体渗流失稳的非线性动力学机制研究还较少, 本文在这方面作些粗浅尝试, 拟用非线性科学中的分岔及突变理论研究破碎岩体中气体渗流失稳的动力学机制, 建立气体非稳态渗流的非线性动力学模型, 利用边值条件求得了系统量纲一变换后的平衡态, 并给出了速度平衡态解图; 然后通过低松弛迭代法分析了不同分支平衡态的稳定性, 并给出了渗流系统相应于不同渗流参数时的动力学响应曲线。研究结果^[16]表明, 破碎岩体渗流动力系统存在鞍结分岔及折迭突变, 分岔点处破碎岩体渗流处于临界稳定状态, 此时微小的扰动就可以诱发气体突出灾害的

发生。

2 气体渗流的非线性动力学方程组

气体的状态方程^[17]可用密度 ρ (kg/m³)表示为

$$\rho = \frac{mp}{ZRT} \quad (1)$$

式中: p 为气体压强; m 为气体的摩尔质量; T 为气体温度; Z 为偏差因子(压缩因子), 且有 $Z = Z(p, T)$; R 为普适气体常量, 且有 $R = 8.314$ J/(mol · K)。

为简单起见, 设在常温、大气压力 p_0 作用下气体的密度为 ρ_0 , 当压力 p 与 p_0 相差不大时, 若不考虑偏差效应, 则有

$$\rho = \frac{p}{p_0} \rho_0 \quad (2)$$

气体渗流的连续性方程、运动方程(不考虑重力项)及多孔介质孔隙压缩状态方程^[15]分别为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\rho c_a \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\mu}{k} v - bv^2 \quad (4)$$

$$\phi = \phi_0 e^{c_\phi(p-p_0)} \quad (5)$$

式中: ϕ 为孔隙率, c_a 为加速度系数, μ 为流体的动力黏度, k 为破碎岩石的渗透率, ϕ_0 为参考压力 p_0 对应的孔隙率, c_ϕ 为孔隙压缩系数。

将式(2), (5)代入式(3), 整理得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{\phi_0 e^{c_\phi(p-p_0)} (1+pc_\phi)} \frac{\partial(pv)}{\partial x} \quad (6)$$

再将式(2)代入式(4), 得到

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{p_0}{p\rho_0 c_a} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{k} v + bv^2 \right) \quad (7)$$

式(6), (7)构成了破碎岩体中气体渗流的动力学方程组。

3 渗流系统的平衡态

对式(6), (7)进行量纲一的变换:

$$\bar{p} = \frac{p}{p_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{H}, \quad \bar{v} = \frac{v}{\mu/(bk)}, \quad \bar{t} = \frac{t}{bkH/\mu} \quad (8)$$

得到量纲一的动力学方程组为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{t}} &= -\frac{1}{\phi_0 e^{c_\phi p_0(\bar{p}-1)} (1+p_0 \bar{p} c_\phi)} \frac{\partial(\bar{p}\bar{v})}{\partial \bar{x}} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} &= -a_1 \frac{\partial \bar{p}}{\bar{p} \partial \bar{x}} - a_2 \frac{\bar{v}}{\bar{p}} - a_3 \bar{v}^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中,

$$a_1 = \frac{p_0}{c_a \rho_0} \left(\frac{bk}{\mu} \right)^2, \quad a_2 = \frac{bH}{\rho_0 c_a}, \quad a_3 = a_2 \quad (10)$$

系统的平衡态(\bar{p}_s, \bar{v}_s)应满足:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}_s}{\partial \bar{t}} &= -\frac{1}{\phi_0 e^{c_\phi p_0(\bar{p}_s-1)} (1+p_0 \bar{p}_s c_\phi)} \frac{\partial(\bar{p}_s \bar{v}_s)}{\partial \bar{x}} = 0 \\ \frac{\partial \bar{v}_s}{\partial \bar{t}} &= -a_1 \frac{\partial \bar{p}_s}{\bar{p}_s \partial \bar{x}} - a_2 \frac{\bar{v}_s}{\bar{p}_s} - a_2 \bar{v}_s^2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

于是由式(11)的第 1 式得到 $\frac{\partial(\bar{p}_s \bar{v}_s)}{\partial \bar{x}} = 0$, 即渗

流平衡时沿着渗流方向各点的孔隙压力与渗流速度的乘积是一个与点的位置无关的常量, 设为 C , 即有

$$\bar{p}_s \bar{v}_s = C \quad (12)$$

代入式(11)的第 2 式, 得

$$\frac{\partial \bar{p}_s}{\bar{p}_s \partial \bar{x}} + \frac{a_2 C}{a_1 \bar{p}_s^2} + \frac{a_2 C^2}{a_1 \bar{p}_s^2} = 0 \quad (13)$$

对式(13)积分, 得

$$\frac{1}{2} \bar{p}_s^2 + \left(\frac{a_2 C}{a_1} + \frac{a_2 C^2}{a_1} \right) \bar{x} = C_1 \quad (14)$$

式中: C_1 为积分常数。

设破碎岩层的堆积高度为 H , 其渗流边界条件为: $p|_{x=0} = p_1, p|_{x=H} = p_2$ (其中 $p_1 > p_2$), 渗流方向沿 x 轴正向, 即 $v > 0$ 。

将有关的边界条件 $\bar{p}_s|_{\bar{x}=0} = \frac{p_1}{p_0}, \bar{p}_s|_{\bar{x}=1} = \frac{p_2}{p_0}$ 代入式(14), 得

$$C_1 = \frac{1}{2} \frac{p_1^2}{p_0^2} \quad (15)$$

$$\frac{a_2}{a_1} (C + C^2) = \frac{1}{2} \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_0^2} \quad (16)$$

将式(15), (16)代入式(14)得到渗流平衡时的量纲一的孔隙气体压力 \bar{p}_s , 且满足:

$$\bar{p}_s^2 = \frac{p_1^2}{p_0^2} - \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_0^2} \bar{x} \quad (17)$$

由式(12)可知, 量纲一的速度平衡态为

$$\bar{v}_s = \frac{C}{\bar{p}_s} \quad (18)$$

由式(17), (18)可知, 在所给定的边界条件 ($p_1 > p_2$) 下气体渗流平衡时, 沿着渗流方向, 气体压力是逐渐减少的, 而渗流速度是逐渐增加的。但平衡时的孔隙压力 \bar{p}_s 沿渗流方向并不是线性下降的, 这一点与水渗流的平衡态 \bar{p}_s 沿着渗流方向线性下降不同^[15]。

由式(16)可知, C 存在实根的前提条件为

$$2 \frac{p_1^2 - p_2^2}{p_0^2} \frac{a_1}{a_2} \geq -1 \quad (19)$$

即

$$b \geq -\frac{p_0 \mu^2 H}{2(p_1^2 - p_2^2)k^2} \quad (20)$$

记

$$b_s = -\frac{p_0 \mu^2 H}{2(p_1^2 - p_2^2)k^2} \quad (21)$$

式中: b_s 为临界 Darcy 流偏离因子。即当 $b < b_s$ 时, C 不存在实根, 渗流系统不存在平衡态; 而当 $b_s < b < 0$ 时, C 存在 2 负根, 因此系统有 2 个量纲一的速度平衡态, 且皆为负值, 即

$$\bar{v}_{s1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 2 \frac{(p_1^2 - p_2^2)bk^2}{p_0 \mu^2 H}}}{2\bar{p}_s} \quad (22)$$

因为已知渗流速度沿 x 轴正向, 即 $v > 0$ 。由李顺才^[15]的研究结果可知:

(1) 当 $b > 0$ 时, 此时量纲一的速度平衡态 $\bar{v} > 0$, 因此当 $b > 0$ 时各点量纲一的速度平衡态只有一个, 即

$$\bar{v}_s = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2 \frac{(p_1^2 - p_2^2)bk^2}{p_0 \mu^2 H}}}{2\bar{p}_s} \quad (23)$$

(2) 当 $b = b_s$ 时, 有 $\bar{v}_s = -\frac{0.5}{\bar{p}_s}$ 。

图 1 为量纲一的速度平衡态随参数变化的示意图。

4 平衡态的稳定性分析

渗流动力系统的稳定性分析是预测预防系统失

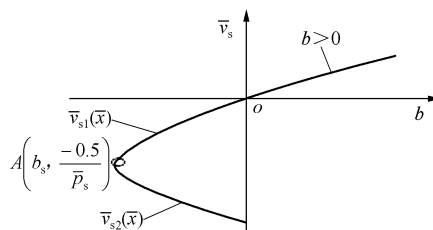


图 1 量纲一的速度平衡态随参数变化的示意图
Fig.1 Schematic diagram of steady state of dimensionless flow velocity varying with parameter

稳突变的理论依据。一个动力系统总是受到各种随机扰动。若系统在扰动作用下偏离平衡运动状态后, 它仍将自动返回该运动状态或不会偏离此运动状态太远, 则这种平衡状态是稳定的。前者称为渐近稳定, 后者称为 Lyapunov 稳定。

对式(9)采用低松弛迭代法求解, 沿高度方向划分节点。在时间方向采用向前差分格式, 在空间方向除边界节点外其余各节点均可采用中心差分格式, 得

$$\left. \begin{aligned} \bar{p}_{i+1,j} &= \bar{p}_{i,j} - \frac{\Delta t}{\phi_0 e^{c_a p_0 (\bar{p}_{i,j-1})} (1 + p_0 \bar{p}_{i,j} c_\phi)} \\ &\left(\bar{p}_{i,j} \frac{\bar{v}_{i,j+1} - \bar{v}_{i,j-1}}{2\Delta x} + \bar{v}_{i,j} \frac{\bar{p}_{i,j+1} - \bar{p}_{i,j-1}}{2\Delta x} \right) \\ \bar{v}_{i+1,j} &= \bar{v}_{i,j} - \Delta t \left(\frac{a_1}{\bar{p}_{i,j}} \frac{\bar{p}_{i,j+1} - \bar{p}_{i,j-1}}{2\Delta x} + \right. \\ &\left. \frac{a_2 \bar{v}_{i,j}}{\bar{p}_{i,j}} + a_3 \bar{v}_{i,j}^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

在扰动作用下初始状态对平衡态有一小的偏离, 根据式(17)假设系统的初始条件为

$$\left. \begin{aligned} p(t, x)|_{t=0} &= \frac{p_{01}^2}{p_0^2} + \frac{p_{02}^2 - p_{01}^2}{p_0^2} \frac{x}{H} \\ v(t, x)|_{t=0} &= v_0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

对于式(25), 设定参数为

$$\left. \begin{aligned} p_{01} &= 0.5 \text{ MPa} \\ p_{02} &= p_0 \quad (p_0 = 0.1035 \text{ MPa}) \\ H &= 5.0 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

相应的边界条件为: 孔压 $p_1 = 0.6 \text{ MPa}$, $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ 。渗透率 $k = 0.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$, 加速度系数 $c_a = 9.46 \times 10^{10}$, 初始密度 $\rho_0 = 1.20 \text{ kg/m}^3$, 初始孔隙率 $\phi_0 = 0.32$, 其气体动力黏度 $\mu = 1.79 \times 10^{-5}$

Pa·s, 破碎岩石孔隙压缩系数 $c_\phi = 2.02 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$, 下面根据参数 b 的符号分以下 3 种情况进行讨论。

4.1 当 $b > 0$ 时平衡态的稳定性分析

任意选取一个大于 0 的参数 b , 设 $b = 8.4 \times 5.12 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$, 初速度 $v_0 = 2.63 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 量纲一变换后为 $\bar{v}_0 = 3.32 \times 10^{-2}$, 量纲一的时间间隔 $\Delta \bar{t} = 2.0 \times 10^{-4}$, 由式(17), (18)可知, 平衡时各节点的量纲一的孔隙气体压力及渗流速度如图 2 所示。

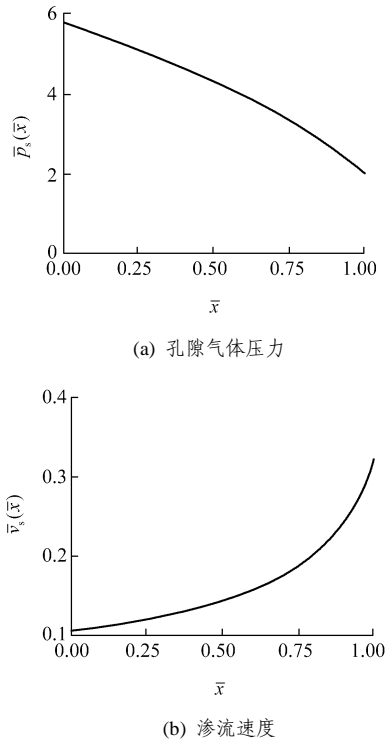


图2 量纲一的孔隙气体压力及渗流速度平衡态沿渗流方向的分布规律

Fig.2 Distribution law along flow direction for dimensionless steady state of pore gas pressure and flow velocity

经过数值计算后得到量纲一的孔隙气体压力及渗流速度的时间曲线如图 3 所示。

对比分析图 2, 3 可知, 孔隙气体压力及渗流速度时间曲线又回到各自的平衡态, 即 $b > 0$ 时的平衡态是稳定的。

4.2 当 $b_s < b < 0$ 时平衡态的稳定性分析

对于上面所给定的孔隙气体压力边界条件及各参数, 由式(21)计算得到极限参数 $b_s = -10.363 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$. 当 $b_s \leq b < 0$ 时, 每个节点的量纲一的渗流速度平衡态有 2 个。若取 $b = -4.300 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$, 则根据前述分析可得到各节点的 2 种量纲一的渗流速度平衡态如图 4 所示。

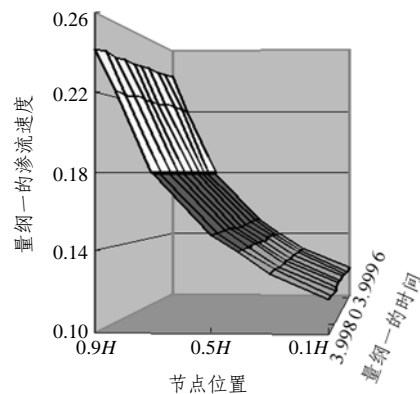
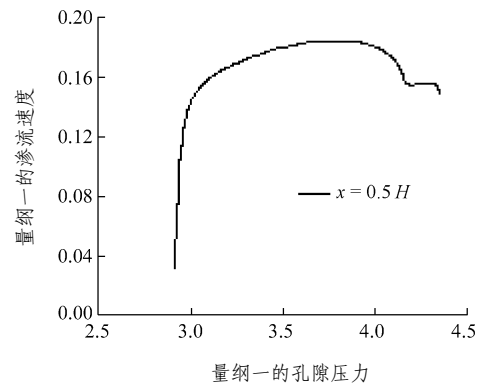
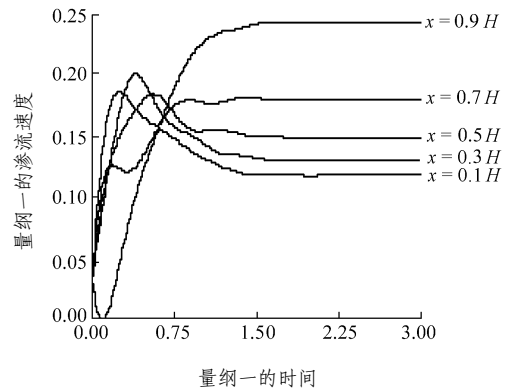
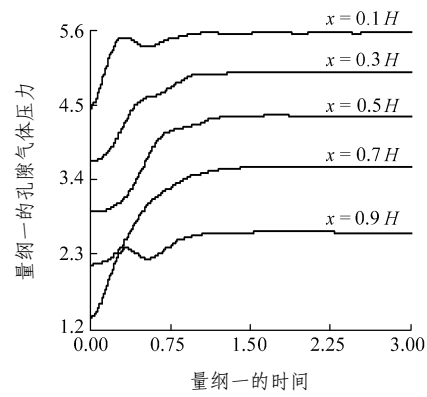
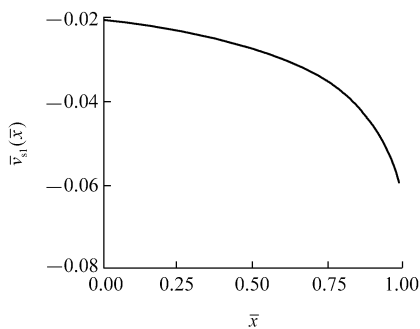
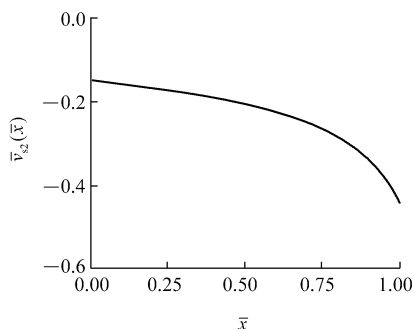


图3 动力学响应($b = 8.4 \times 5.12 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$)

Fig.3 Dynamic responses at $b = 8.4 \times 5.12 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$



(a) 分支 1



(b) 分支 2

图 4 平衡态渗流速度分布图($b = -4.300 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$)

Fig.4 Flow velocity distribution along flow direction of steady states at $b = -4.300 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$

4.2.1 平衡态 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 分支的稳定性

下面根据初始速度与平衡态速度的大小关系分以下 2 种情况进行平衡态的稳定性分析:

(1) 当各点初始速度位于其平衡态速度 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 曲线上方即 $\bar{v}_0 > \bar{v}_{s1}$ 时, 取 $v_0 = 9.63 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 量纲一化后 $\bar{v}_0 = -1.1569 \times 10^{-2}$, 经过迭代计算得到系统的动力学响应分别如图 5 所示。

将图 4(a)与 5(b)对比可知, 当各点初始速度大于其各自平衡态速度 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 时经过一段时间后, 渗流速度又稳定地回到其平衡态值 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 。

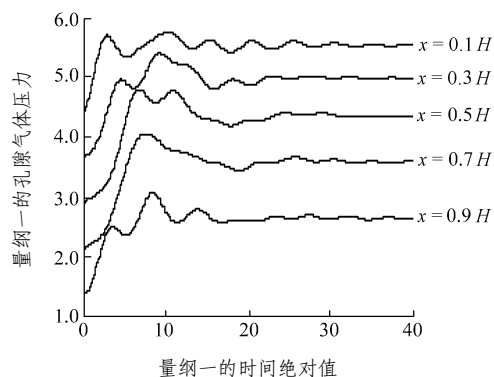
(2) 当各点初始速度位于平衡态速度 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 曲线下方, 即 $\bar{v}_0 < \bar{v}_{s1}$ 时, 取 $v_0 = 6.63 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 量纲一化后 $\bar{v}_0 = -7.9649 \times 10^{-2}$, 经过迭代计算得到系统的动力学响应分别如图 6 所示。

同理, 将图 4(a)与 6(b)对比可知, 每个节点的速度时间曲线最后都回到各自的平衡态 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$, 所以此时渗流系统是稳定的。

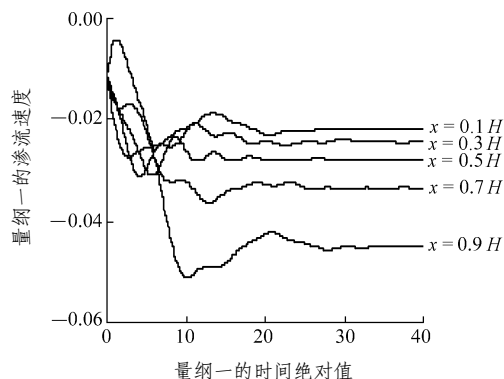
4.2.2 平衡态分支 2 的稳定性

同样也分 2 种情况来分析:

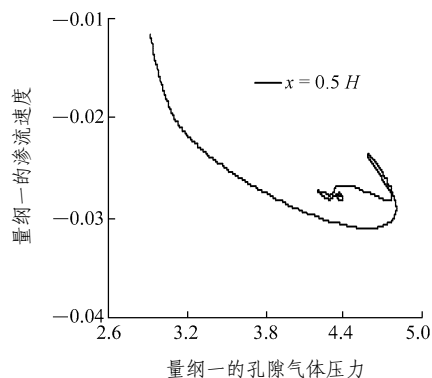
(1) 当初始速度位于平衡态速度 $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$ 曲线上方即 $\bar{v}_0 > \bar{v}_{s2}$ 时, 取 $v_0 = 9.63 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, 量纲一化后 $\bar{v}_0 = -0.11569$, 经过迭代计算得到系统的动力学



(a) 孔隙气体压力 - 时间曲线



(b) 渗流速度 - 时间曲线



(c) 孔隙气体压力 - 渗流速度相轨线

图 5 当初始速度大于平衡态速度 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 时的动力学响应

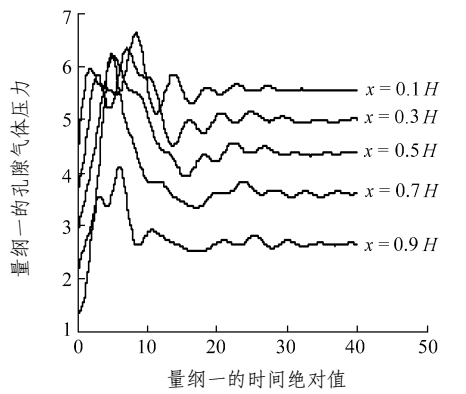
Fig.5 Dynamic responses when initial velocity is larger than steady state velocity $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$

响应分别如图 7 所示。

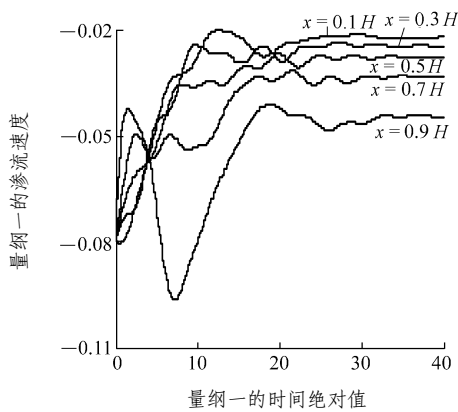
对比图 4(b)与 7(b)的数据可知, 此时各节点的运动并未回到它本身的平衡态 $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$, 反而被吸引到相应的上一个分支平衡态 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 上。

(2) 当初始速度位于平衡态速度 $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$ 曲线下方即 $\bar{v}_0 < \bar{v}_{s2}$ 时, 取 $v_0 = 3.95 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 量纲一化后 $\bar{v}_0 = -0.47453$, 经过迭代计算得到 $x = 0.5H$ 处系统的渗流速度时间曲线如图 8 所示。

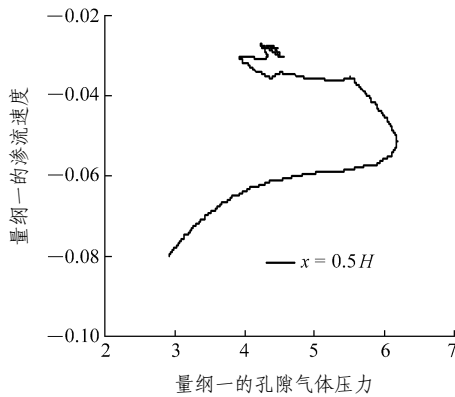
同理, 对比图 4(b)与 8 可知, 此时各点渗流速度也未回到它本身的平衡值, 相反其速度值越来



(a) 孔隙气体压力 - 时间曲线



(b) 渗流速度 - 时间曲线



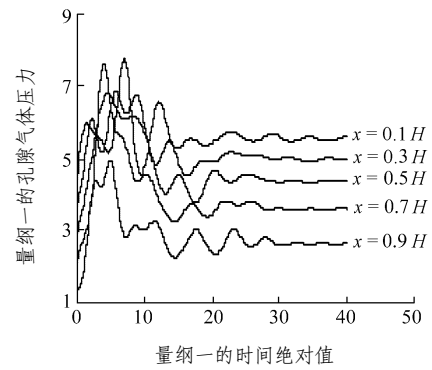
(c) 孔隙气体压力 - 渗流速度相轨线

图6 当初始速度小于平衡态速度 $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$ 时的动力学响应
Fig.6 Dynamic Responses when initial velocity is less than steady state velocity $\bar{v}_{s1}(\bar{x})$

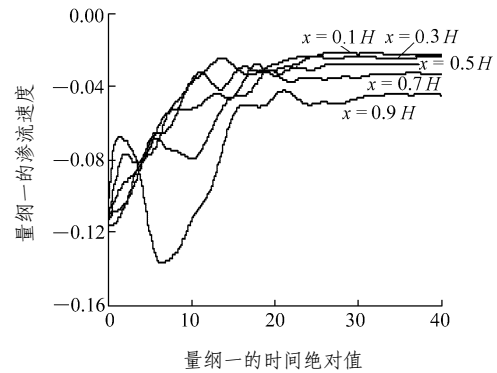
越大, 系统迅速失稳。

4.3 当 $b < b_s$ 时的动力学响应

由前面平衡态的分析可知, 当 $b < b_s$ 时, 系统无平衡态。前面已计算得到 $b_s = -10.363 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$, 若取 $b = -11.563 \times 10^{10} \text{ kg/m}^4$, 任意给定一小的初速度 $v_0 = 2.63 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 量纲一化后为 $\bar{v}_0 = 8.4947 \times 10^{-4}$, 经过迭代计算可知, 系统很快失稳, 其动力学响应如图9所示。



(a) 孔隙气体压力 - 时间曲线



(b) 渗流速度 - 时间曲线

图7 当初始速度大于平衡态速度 $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$ 时的动力学响应
Fig.7 Dynamic responses when initial velocity is larger than steady state velocity $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$

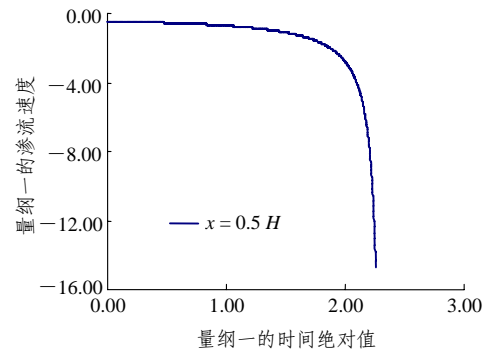
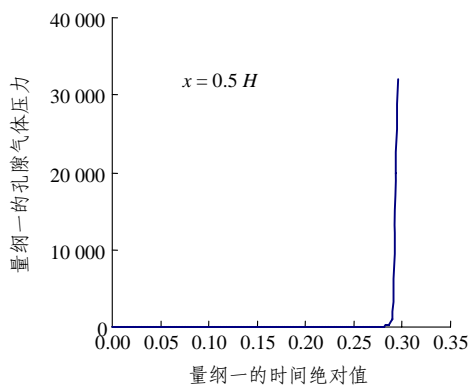


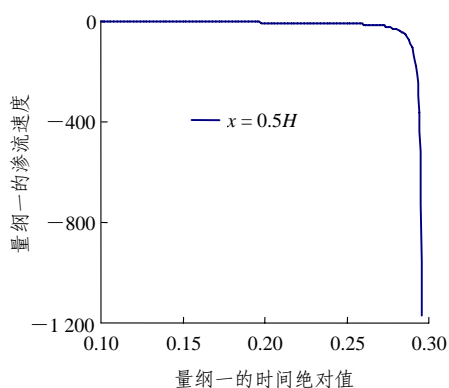
图8 当初始速度小于平衡态速度 $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$ 时的渗流速度 - 时间曲线
Fig.8 Dynamic responses when initial velocity is less than steady state velocity $\bar{v}_{s2}(\bar{x})$

5 气体非 Darcy 渗流的鞍结分岔及折叠突变

由上分析可知: 当 $b > 0$ 时的平衡态是稳定的; 而当 $b_s < b < 0$ 时有 2 个平衡态分支 \bar{v}_{s1} , \bar{v}_{s2} , 此时所有初始速度大于平衡态速度 \bar{v}_{s2} 的各点其渗流速度最后都被吸引到平衡态 \bar{v}_{s1} 所对应的值, 即 \bar{v}_{s1} 分支



(a) 孔隙气体压力 - 时间曲线



(b) 渗流速度 - 时间曲线

图 9 当 $b < b_s$ 时渗流系统失稳

Fig.9 Flow system instability corresponding to $b < b_s$

对应稳定的平衡态(节点), 而 \bar{v}_{s2} 分支对应不稳定的平衡态(鞍点)。在极限点 $A(b = b_s)$ 处, 鞍点和节点相遇而湮灭, 平衡点消失。到 $b < b_s$ 时系统无实数平衡态, 对任意给定的初速度系统都会发生渗流失稳。因此, 系统在 $b = b_s$ 处发生鞍结分岔(折叠分岔), 如图 10 所示, 同时根据李顺才^[15]所得破碎岩石的渗

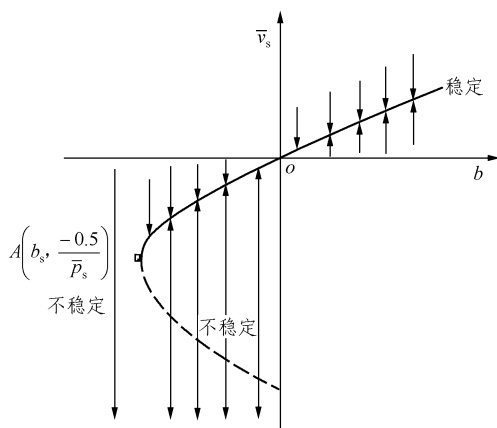


图 10 破碎岩体渗流系统的鞍结分岔

Fig.10 Saddle-node bifurcation for flow system of broken rock mass

流试验结果可知, 在分岔点处, $b = b_s < 0$, 此时岩石的颗粒棱角破碎现象已非常严重。鞍结分岔是一种典型的非连续分岔, 在分岔点处系统的稳定性发生了突变, 根据突变理论^[16, 18]可知, 系统在折叠分岔点处易发生折叠突变, 任意细小扰动可引发突出等动力灾害。

6 结 论

采动破碎岩体渗流行为的研究是煤矿围岩稳定性控制、突出灾害防治、地下资源开发及利用等一系列重大课题的基础研究课题。基于破碎岩体中渗流的非线性、非稳态特点, 采用非线性分岔及突变理论研究破碎岩体中气体渗流失稳的动力学机制。

(1) 根据气体渗流的连续性方程、运动方程以及状态方程, 建立了破碎岩体中气体非稳态、非达西渗流的动力学方程组。

(2) 得到了渗流系统在所给渗流边界条件下的量纲一渗流速度平衡态随达西流偏离因子的变化示意图; 指出气体渗流的平衡态性质与水渗流不同, 表现在水渗流平衡时沿着渗流方向, 孔隙水压力线性下降, 各点的渗流速度大小相同; 而气体渗流平衡时各点孔隙压力的平方沿着渗流方向线性下降, 但孔隙压力与渗流速度的乘积保持不变。

(3) 给出了渗流速度平衡态分支图, 速度平衡态存在 3 个分支, 通过数值计算分析了各分支平衡态的稳定性, 给出了渗流系统在不同参数下的动力学响应曲线。分析表明渗流系统存在鞍结分岔及折叠突变, 在分岔点处任意微小的扰动可引发突出动力灾害。

参考文献(References):

[1] 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. Seepage theory of mining rock mass[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))

[2] 王树玉. 煤矿五大灾害事故分析和防治对策[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.(WANG Shuyu. Analysis and prevention to the five serious disasters in coal mine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006.(in Chinese))

[3] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社,

- 1994.(ZHAO Yangsheng. Rock fluid mechanics in mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [4] 刘保县, 鲜学福, 姜德义. 煤与瓦斯延期突出机制及其预测预报的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 647 - 650.(LIU Baoxian, XIAN Xuefu, JIANG Deyi. Research on the mechanism and prediction of delay outburst of coal and gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 647 - 650.(in Chinese))
- [5] 王旭升, 陈占清. 岩石渗透试验瞬态法的水动力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 3 098 - 3 105.(WANG Xusheng, CHEN Zhanqing. Hydrodynamic analysis of transient method in rock seepage tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 098 - 3 105.(in Chinese))
- [6] 孙明贵, 黄先伍, 李天珍, 等. 石灰岩应力 - 应变全过程的非达西流渗透特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 484 - 491.(SUN Mingui, HUANG Xianwu, LI Tianzhen, et al. Seepage properties of non-Darcy flow in complete failure process of limestone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 484 - 491.(in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 黄伟, 四旭飞, 厉彦菊. 气体渗流系统的失稳及其概率应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2005, 24(4): 81 - 83.(HUANG Wei, SI Xufei, LI Yanju. Instability of the seepage system of gas and application in probability[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2005, 24(4): 81 - 83.(in Chinese))
- [9] ARMENTA M, WOJTANOWICZ A K. Rediscovering non-Darcy flow effect in gas reservoir[C]// Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, USA: Society of Petroleum Engineers, 2003: 399 - 406.
- [10] TISS M, EVANS R D. Measurement and correlation of non-Darcy flow coefficient in consolidated porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1989, 3(1/2): 19 - 33.
- [11] MORRISON F A. Transient non-Darcy gas flow in a porous medium[C]// Numerical/Laboratory Computation Methods in Fluid Mechanics Presented at Winter Annual Meeting of the ASME. New York, USA: [s. n.], 1976: 311 - 323.
- [12] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非达西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. Bifurcation of non-Darcy flow in post-failure rock[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(6): 660 - 667.(in Chinese))
- [13] 刘卫群, 缪协兴, 余为, 等. 破碎岩石气体渗透性的试验测定方法[J]. 实验力学, 2006, 21(3): 399 - 401.(LIU Weiqun, MIAO Xiexing, YU Wei, et al. A testing method for determining the gas permeability of over-broken rocks[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(3): 399 - 401.(in Chinese))
- [14] 余为. 破碎岩体中的气体流动规律研究[硕士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2005.(YU Wei. Studies on the laws of gas flow in over-broken rock mass[M. S. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2005.(in Chinese))
- [15] 李顺才. 破碎岩体非 Darcy 渗流的非线性动力学研究[博士学位论文][D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.(LI Shuncai. Nonlinear dynamical study on non-Darcy flow in broken rock[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))
- [16] 许强, 黄润秋, 王来贵. 外界扰动诱发地质灾害的机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 280 - 284.(XU Qiang, HUANG Runqiu, WANG Laigui. Mechanism analysis of geological hazards triggered by external disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 280 - 284.(in Chinese))
- [17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.(KONG Xiangyan. Advanced mechanics of fluid in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.(in Chinese))
- [18] 刘秉正, 彭建华. 非线性动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.(LIU Bingzheng, PENG Jianhua. Nonlinear dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.(in Chinese))