

# 岩石渗透试验瞬态法的水动力学分析

王旭升<sup>1</sup>, 陈占清<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学 理学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 压力脉冲瞬态法是一种专门进行岩石渗透率测试的新方法。对多孔介质渗流的水动力学分析表明, 在岩石渗透试验的瞬态法中, 水流动量方程可以不考虑流速的变化率。对于致密岩石, 出现高速非 Darcy 流的特征不显著, 在一般条件下 Darcy 定律仍然有效。给出压力脉冲瞬态法的物理模型和数学模型, 采用等梯度假设简化连续性方程, 针对上下游压力容器的不同控制条件, 推导各种情况下压力测试曲线的解译公式。这些解译公式为分析不同控制方式下的试验过程和计算岩石渗透率提供了方便。实例表明, 基于等梯度假设的解译公式对压力脉冲瞬态法所产生的渗透率测试曲线基本适用。

**关键词:** 岩石力学; 岩石; 渗透率; 瞬态法; 解译方法; 水动力学

**中图分类号:** TU 458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 3098 - 06

## HYDRODYNAMIC ANALYSIS OF TRANSIENT METHOD IN ROCK SEEPAGE TESTS

WANG Xusheng<sup>1</sup>, CHEN Zhanqing<sup>2</sup>

(1. *School of Water Resources and Environmental Science, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

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

**Abstract:** Transient pulse method is a newly developed technique in rock seepage tests to measure permeability of rocks. The theory of fluid dynamics in porous media is applied to analyze the hydrodynamic characteristics of transient method in rock seepage tests. It is identified that, in the momentum equation, the variation of flow velocity is able to be neglected for seepage in rocks. High-speed non-Darcy flow as shown by Forchheimer's equation is insignificant for seepage in tight rocks and Darcy Law is normally valid. As one of the fundamental hydrodynamic equations describing the transient seepage in rocks, the continuous equation is applied to explain the change of pressure in the rock seepage tests with initial and boundary conditions. Physical and mathematic models of the transient method are presented. Interpretative formulas are derived for time-dependent pressure curves at several controlled conditions of the upstream and downstream reservoirs, with the assumption of equal pressure gradient. This assumption simplifies the solution process of partial deference equation in the mathematic model. The interpretative formulas provide conveniences for the analysis of the test process and calculation of permeability with defferent control methods: (1) water capacities of both the upstream and the downstream pressure vessels are fixed; (2) water capacity of the upstream pressure vessel is fixed and the pressure of the downstream boundary is constant; (3) flux of water from the upstream pressure vessel, which is determined by moving speed of the plunger, is constant and the pressure of the downstream boundary is constant. For the third control method, a formula is derived to predict the decrease of the pressure in the upstream reservoirs after stopping the plunger from moving. Validity of the interpretative formulas is identified by the well fitting of the

**收稿日期:** 2005 - 09 - 09; **修回日期:** 2006 - 01 - 05

**基金项目:** 国家杰出青年基金项目(50225414); 国家自然科学基金重点项目(50490270); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB221502)

**作者简介:** 王旭升(1974 - ), 男, 博士, 1997年毕业于中国地质大学水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事渗流力学、水文模型方面的教学与研究工作。E-mail: wxsh@cugb.edu.cn

pressure-time curves in permeability test cases for the three types of control methods. It shows the application of the assumption of equal pressure gradient.

**Key words:** rock mechanics; rock; permeability; transient method; interpretative method; hydrodynamics

## 1 引言

基于低压环境的常规渗透试验方法,对致密的低渗透性岩石效率很差。针对这个问题, W. F. Brace 等<sup>[1]</sup>提出了高压力脉冲的瞬态法(transient pulse method),主要通过测量岩石样品两端压力容器的压强变化来获得渗透率。经过 20 多年的推广应用,这种方法逐渐成为油气工程和岩石力学研究的重要试验方法<sup>[2]</sup>。在美国 MTS 公司生产的伺服岩石力学试验系统中,压力脉冲瞬态法已经成为一个成熟的配套技术<sup>[3]</sup>。近年来国内许多高校和科研机构都相继引进该类设备,促进了中国同行利用这一先进技术开展岩石渗透特性问题的研究,特别是研究全应力-应变过程中岩石渗透性的变化。用压力脉冲瞬态法既可以观测致密岩石的渗透率,也可以观测破坏后岩石散体的渗透率,试验原理是相通的,因此在本文中统一作为岩石渗透试验进行讨论。

在压力脉冲瞬态法试验过程中,通常会得到一系列压力容器的压强随时间的变化曲线,工程人员就是用这些曲线计算岩石渗透率的。目前,虽然已经积累了丰富的试验成果,但大多数研究人员直接采用 MTS 岩石力学伺服系统说明书中的公式进行计算,对其水动力学机制还缺乏分析。中国矿业大学研制了一套含有可移动活塞的渗透仪装置<sup>[4]</sup>,对 MTS 岩石力学伺服系统的渗透率测量方法进行了改进,弥补了原系统无法测量渗透流量的不足。不过,活塞控制下的压力曲线仍然没有合适的解译公式,渗透率是根据试验末期的近稳态曲线得到的,影响了大部分试验数据的利用。

在此,笔者有意就若干岩石渗透试验瞬态法相关的水动力学问题进行分析,并推导各种边界控制条件下的渗透率测试曲线解译公式,引发讨论,以期对其物理机制有一个更加清楚的认识。

## 2 渗流的动量方程

在采用动量方程描述岩石的瞬态渗流过程<sup>[5, 6]</sup>时,需要分析水在多孔介质中渗流的基本特征。为

了给出 Darcy 定律的动力学解释, S. Irmay<sup>[7]</sup>利用 Navier-Stokes 方程在多孔介质中的统计平均性质,推导了渗流的动量方程。按照现在的符号习惯,一维动量方程可以表示为如下形式:

$$J = \frac{\mu}{k\rho_w g} V + \frac{b}{g} V^2 + \frac{1}{ng} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $J$  为水力梯度;  $n$  为孔隙度,  $V$  为渗透流速(平均实际流速为  $V/n$ );  $\mu$  为水的动力黏度;  $\rho_w$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $k$  为多孔介质的渗透率;  $b$  为与孔隙特征有关的、大于 0 的系数。

关于水的渗流中流速的变化率, Polubarinova-Kochina 指出,除去运动开始的瞬间(大约是零点几秒)外,这个附加项将迅速趋于 0<sup>[8]</sup>。在致密岩石渗透试验中,水力梯度的数量级可达  $10^{-3}$ , 渗透系数的数量级一般小于  $10^{-6}$  m/s, 渗透流速极大数量级为  $10^{-3}$  m/s, 假设在 0.1 s 内流速就从 0 达到这个极限流速,孔隙度按照极小值 0.01 算,则流速变化项所产生的附加水力梯度占总水力梯度的比例,在这 0.1 s 的时间内仅约为 0.01%。即使对于松散碎石体,这一比例通常也小于 5%。因此,流速变化项的影响是完全可以忽略的。

忽略流速变化项之后,式(1)演变为 Forchheimer 公式。Forchheimer 公式反映了在发生高速非 Darcy 流时,水力梯度与渗透流速具有二阶非线性关系<sup>[8]</sup>。S. Irmay<sup>[7]</sup>对动量方程的动力学分析给出了高速非 Darcy 流的解释。大量试验研究表明,反映渗流阻力的 Fanning 摩擦因数与雷诺数  $Re$  之间并非单纯的直线关系,而是在大  $Re$  时表现出二次曲线关系<sup>[9]</sup>。Blick 模型<sup>[10]</sup>在解释 Forchheimer 公式时,把孔隙通道假设为被孔板均匀隔开的毛细管,这样水在毛细管中流动受到的阻力就包括毛细管壁的黏滞阻力和孔板的惯性阻力,前者产生沿程水头损失,与渗透流速的一次方成正比,而后者产生局部水头损失,与渗透流速的二次方成正比。但是,只有在强渗透介质中,当渗透流速很大时,高速非 Darcy 流才能够达到显著水平。大量前人试验结果<sup>[8]</sup>表明,多孔介质渗流显著偏离 Darcy 定律的情况发生在  $Re > 10$  的条件下,对于孔隙尺度小于 0.1 mm 的致密岩石来说,渗透流速很难达到  $Re > 10$  的水平。

因此，在一般条件下，作为动量方程的简化形式，Darcy 定律对致密岩石渗透试验仍然是有效的。松散碎石体则可能出现显著的高速非 Darcy 流现象。但是如果岩体的渗流过程伴随应力 - 应变过程，导致孔隙形态或结构的变化，在表观上可能形成渗透流速与水力梯度不成正比的情况，甚至引发理论上渗流系统的一些异常行为<sup>[11]</sup>。这种情况与 Forchheimer 公式所反映的非 Darcy 流具有不同的物理含义，两者不宜混淆。

非 Darcy 流的另一个方面是当渗透性很低而水力梯度又很小时，渗透流速与水力梯度的关系偏离 Darcy 定律，多发生在以膨胀性黏土矿物为基质的土体中。岩石裂隙水流的这种低速非 Darcy 流现象也常有试验报道<sup>[12, 13]</sup>，但是偏离 Darcy 定律的机制目前还没有统一的看法。

### 3 物理模型和数学模型

通常，压力脉冲瞬态法试验装置属于岩石力学伺服系统的一个配套部分，仪器结构比较复杂，但是渗透率测定的物理模型可以用图 1 来简单表示。岩石力学伺服系统提供试样的轴压  $\sigma_1$  和围压  $\sigma_3$ ，而渗流元件由 3 个部分组成，即上游压力容器、岩石试样和下游压力容器。在中国矿业大学研制的渗透仪中，上游压力容器还受到一个可移动活塞的控制<sup>[4]</sup>，试验过程中能够直接获得的变量是上、下游压力容器的压强  $p_1$ ， $p_2$  和活塞的移动速率  $u_0$ 。

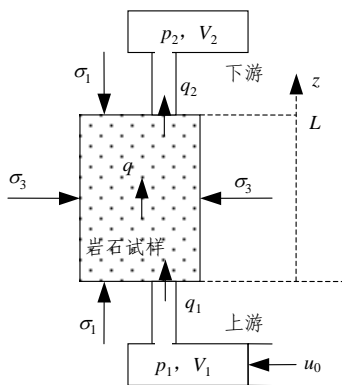


图 1 岩石渗透试验瞬态法示意图

Fig.1 Sketch of transient method for seepage test of rocks

显然，这是一个沿铅直方向的一维饱和渗流问题，利用 Darcy 定律，水流的连续性方程为

$$\frac{\rho_w g k}{\mu} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \rho_w g (n\beta_w + \beta_r) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式中： $z$  为从上游到下游方向的直线距离； $\beta_w$  为水的压缩系数； $\beta_r$  为岩石骨架对应有效应力的压缩系数； $H$  为水头，且有

$$H = z + \frac{p}{\rho_w g} \quad (3)$$

式中： $p$  为孔隙水的压强。考虑到试样的高度一般不大于 10 cm，铅直坐标变化所产生的压强差在 1.0 kPa 以内，如果压力容器的实际压强差在 20 kPa 以上，忽略式(3)中  $z$  所产生的误差(小于 5%)是可以接受的。因此，渗流连续性方程又可以用压强表示为

$$\frac{k}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = (n\beta_w + \beta_r) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

式(4)正是许多文献<sup>[1, 2, 14~16]</sup>中采用的描述方式。

令

$$C_s = (n\beta_w + \beta_r)AL \quad (5)$$

式中： $C_s$  为岩石试样的容水度， $A$  为试样的横截面积， $L$  为试样高度。在上述物理模型中，还有 2 个重要的参数，就是上、下游压力容器的容水度 (storage of pressure vessels)，其值等于增大一个单位压强所能够容纳的水体积的增量。上游压力容器容水度  $C_1$  的定义式为

$$C_1 = \frac{d(\rho_w V_1)}{\rho_w dp_1} = \frac{dV_1}{dp_1} \quad (6)$$

式中： $V_1$  为上游压力容器(具有一定的膨胀性)的容水体积。同理可以定义下游压力容器的容水度  $C_2$ 。压力容器的容水度主要取决于其体积，数量级为  $10^{-14} \text{ m}^3/\text{Pa}$ 。

为了使试样中的瞬态渗流成为定解问题，还需要确定初始条件和边界条件。如图 1 所示，试样上下两端边界条件是由压力容器的控制方式决定的。针对上下游定容(即  $V_1$ ， $V_2$  不变)的情况，W. F. Brace 等<sup>[1, 14]</sup>只给出了近似解，P. A. Hsieh 等<sup>[15]</sup>给出了级数形式的精确解析解，W. Lin<sup>[16]</sup>给出了有限差分法数值解。由于精确解析解和数值解的求解过程比较麻烦，在工程领域并没有得到普遍运用。

经验表明，通过简化处理得到的近似解可以相当好地拟合试验曲线。这种简化处理采用下面的近似式代替试样中的连续性方程：

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{p_1 - p_2}{L} = -\frac{\Delta p}{L} \quad (0 \leq z \leq L) \quad (7)$$

式中： $\Delta p$  为压差，且  $\Delta p = p_1 - p_2$ 。然后根据初始

条件和边界条件即可非常简单地求出上下游的压力变化函数。显然，真实压力梯度是坐标  $z$  的函数，而式(7)采用了等梯度假定，必然产生计算误差，只要误差在允许范围内就是可用的。根据精确解，这种近似法的误差主要取决于岩石试样的容水度  $C_s$  与上、下游压力容器容水度  $C_1, C_2$  的比值，比值越小， $C_s$  的作用就越不显著。受致密岩石试样尺寸和孔隙度的限制，通常  $C_s$  远小于  $C_1$  和  $C_2$ ，因此采用等梯度假定是可行的。

### 4 渗透率测试曲线的解译

下面，在 Darcy 定律适用条件下，利用等梯度假定式(7)来推导不同控制方式下渗透率测试曲线的解译公式。

#### 4.1 上、下游定容的试验曲线

压力脉冲瞬态法的标准试验过程是先让试样两端压力  $p_1, p_2$  平衡，然后突然降低  $p_2$  到  $p_{20}$ ，封闭并固定压力容器的体积，水流经过试样从上游容器进入下游。这个试验过程的初始条件为

$$\left. \begin{aligned} p(z < L, t = 0) &= p_{10} \\ p(z = L, t = 0) &= p_{20} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} &= C_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \\ \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=L} &= -C_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

综合式(7)~(9)，可以求解得到

$$\Delta p(t) = p_1 - p_2 = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{kA}{\mu L} \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} t\right) \quad (10)$$

$$p_1 = p_{10} - \Delta p_0 \frac{C_2}{C_1 + C_2} \left(1 - e^{-\frac{kA}{\mu L} \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} t}\right) \quad (11)$$

$$p_2 = p_{20} + \Delta p_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left(1 - e^{-\frac{kA}{\mu L} \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} t}\right) \quad (12)$$

其中，

$$\Delta p_0 = p_{10} - p_{20}$$

式(10)反映了压差变化曲线具有指数函数形式，容易得到渗透率的计算式为

$$k = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \frac{\mu L}{A \Delta t} \ln \frac{\Delta p_t}{\Delta p_{t+\Delta t}} \quad (13)$$

式中： $\Delta t$  为数据点对的时间间隔； $\Delta p_t, \Delta p_{t+\Delta t}$  分别为压差曲线上 2 个控制点的压差。式(13)为 MTS 岩石力学伺服系统求解渗透率的参考公式<sup>[3]</sup>。

式(11), (12)表明，上下游压强都向同一个压强值  $p_c$  收敛，其表达式为

$$p_c = p_{20} + \Delta p_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (14)$$

当上、下游压力容器的容水度相同时，这个收敛压强就是上、下游初始压力的平均值。图 2 给出了一个实例。在这个实例中，压力容器的压强变化趋势可以非常精确地用式(11), (12)拟合，并且得到  $C_1 : C_2 = 0.46 : 0.54$ 。

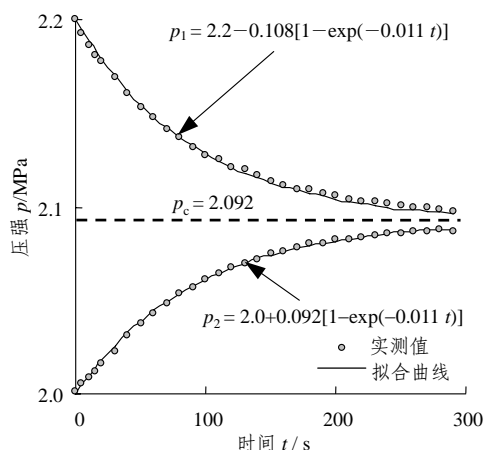


图 2 花岗岩试样破坏后的渗透率测试曲线<sup>[17]</sup>  
Fig.2 Curves of permeability tests on damaged granite<sup>[17]</sup>

#### 4.2 上游定容、下游定压的试验曲线

这种试验方法过程与标准试验过程不同之处在于，当下游压力突然降低后，保持其压力不变，而上游压力逐渐减小。这种条件下的初始条件与式(8)相同，而边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} &= C_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \\ p_2(t > 0) &= p_{20} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

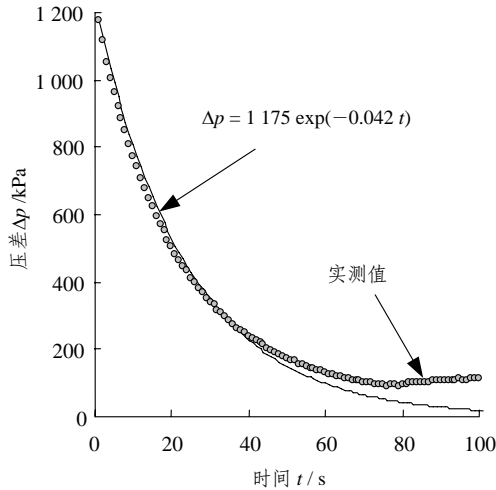
综合式(7), (8), (15)，可以求出

$$\Delta p(t) = p_1 - p_2 = \Delta p_0 \exp\left(-\frac{kA}{\mu L C_1} t\right) \quad (16)$$

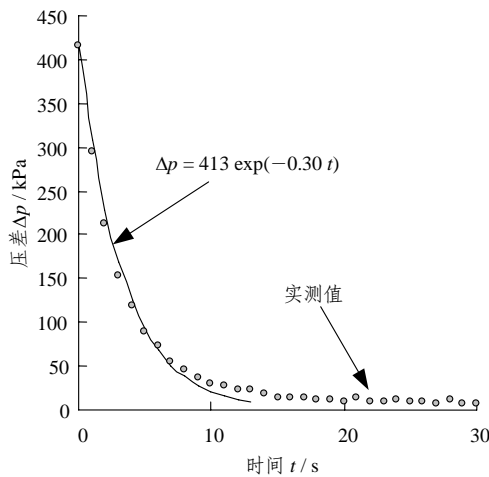
压差变化曲线也具有指数形式，并且与下游压力容器的体积无关。这种情况下的渗透率计算式为

$$k = \frac{\mu L C_1}{A \Delta t} \ln \frac{\Delta p_t}{\Delta p_{t+\Delta t}} \quad (17)$$

图 3 给出了利用式(16)拟合含砾灰岩渗透率测试曲线的一个实例。从拟合效果来看,在试验末期实际的压差衰减速率小于计算结果,这可能是孔压下降后试样更加密实、渗透性降低造成的。



(a) 破坏前



(b) 破坏后

图 3 含砾灰岩破坏前、后渗透率测试曲线

Fig.3 Curves of permeability of intact and damaged gravelly limestone

### 4.3 上游定流量、下游定压的试验曲线

刘卫群等<sup>[4]</sup>提出的改进方法中,是先让上、下游达到压力平衡,然后在上游通过一个以恒定速率移动的活塞控制流量,下游保持压力不变。

这种情况下的初始条件为

$$p(z \geq 0, t = 0) = p_{10} \quad (18)$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} q_0 + \frac{kA}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} &= C_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \\ p_2(t > 0) &= p_{10} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中:  $q_0$  为活塞人工移动产生的驱动流量,  $q_0 = u_0 A_0$ ,  $u_0$  和  $A_0$  分别为活塞的移动速率和截面积。式(19)中,假定容水度  $C_1$  是不变的,压力容器的体积可以取活塞推到终点时的体积,只要活塞移动引起的相对容积变化很小,这种假设是合理的。利用式(7)和(19)可以得到压差的变化率为

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = -\frac{kA}{\mu C_1 L} \left( \Delta p - \frac{q_0 \mu L}{kA} \right) \quad (20)$$

利用初始条件式(18)可以得到压差变化函数为

$$\Delta p(t) = \frac{q_0 \mu L}{kA} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kA}{\mu C_1 L} t\right) \right] \quad (21)$$

这表明上游压力将逐渐增加并趋向一个稳定值,即在试样内最终形成稳定流。根据稳定时的压强差可以计算渗透率为

$$k = \frac{q_0 \mu L}{A \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta p(t)} \quad (22)$$

上式表明,渗透率与上下游压力容器的体积都没有关系。为了确定整个试验过程中的岩石平均渗透率,应该采用迭代的方法拟合试验曲线。

为了结束试验,经过时间  $t_c$  之后,活塞立即停止运动,则上游压力将逐渐回落,这时压差的变化函数为

$$\Delta p(t) = \frac{q_0 \mu L}{kA} f(t_c) \exp\left(-\frac{kA}{\mu C_1 L} t\right) \quad (t > t_c) \quad (23)$$

其中,

$$f(t_c) = \exp\left(\frac{kA t_c}{\mu C_1 L}\right) - 1 \quad (24)$$

这种试验条件下的典型实例见图 4。

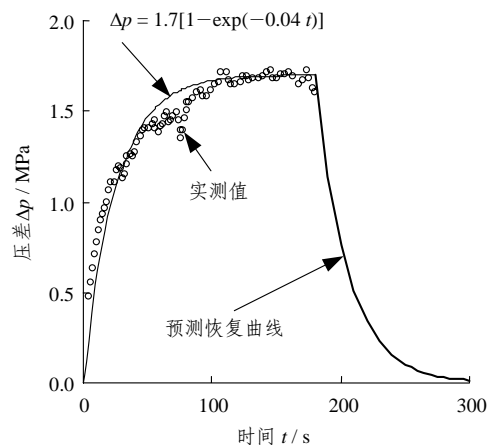


图 4 活塞控制下的砂岩渗透率测试曲线<sup>[4]</sup>

Fig.4 Curves of plunger-controlled permeability test on sandstone<sup>[4]</sup>

## 5 结 论

根据水动力学分析, 在岩石渗透试验的瞬态法中, 水流动量方程可以不考虑流速的变化率。对于致密岩石, 出现高速非 Darcy 流的特征也不显著, Darcy 定律一般仍然有效。水流连续性方程是描述岩石渗透试验瞬态法的基本动力学方程, 与初始条件和边界条件联立组成定解问题, 能够解译上、下游压力容器的压强随时间变化的曲线。本文给出了试验过程的物理模型和数学模型, 采用等梯度假设简化连续性方程, 推导了不同控制条件测试曲线的解译公式。这些解译公式为分析试验过程和计算岩石渗透率提供了方便。实例表明, 基于等梯度假设的解译公式对压力脉冲瞬态法所产生的渗透率测试曲线是基本适用的。

### 参考文献(References):

- [1] Brace W F, Walsh J B, Frangos W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(6): 2 225 - 2 236.
- [2] 李小春, 高桥学, 吴智深, 等. 瞬态压力脉冲法及其在岩石三轴试验中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(增 1): 1 725 - 1 733.(Li Xiaochun, Takahashi M, Wu Zhishen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(Supp.1): 1 725 - 1 733.(in Chinese))
- [3] MTS Systems Corporation. Model 815 rock and concrete mechanics test system technical description(Version 5)[R]. Minnesota, USA: MTS Systems Corporation, 1999.
- [4] 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): 56 - 61.(Liu Weiqun, Miao Xiexing, Chen Zhanqing. A testing method for determining the permeability of overbroken rock[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(1): 56 - 61.(in Chinese))
- [5] 程宜康, 陈占清, 缪协兴, 等. 峰后砂岩非 Darcy 流渗透特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(12): 2 005 - 2 009.(Cheng Yikang, Chen Zhanqing, Miao Xiexing, et al. Testing study on permeability of non-Darcy flow in post-peak sandstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(12): 2 005 - 2 009.(in Chinese))
- [6] 李天珍, 李玉寿, 马占国. 破裂岩石非达西渗流的试验研究[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)).
- [7] Irmay S. On the theoretical derivation of Darcy and Forchheimer formulas[J]. *Transactions of the American Geophysics Union*, 1958, 39(4): 702 - 707.
- [8] Bear J. *Dynamics of Fluids in Porous Media*[M]. New York: American Elsevier, 1972.
- [9] 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 Fluid Dynamics in Porous Media*[M]. Hefei: University of Sciences and Technology of China Press, 1999.(in Chinese))
- [10] Blick E F. Capillary orifice model for high speed flow through porous media[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1966, 5(1): 90 - 94.
- [11] 缪协兴, 陈占清, 茅献彪, 等. 峰后岩石非 Darcy 渗流的分叉行为研究[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)).
- [12] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 光滑裂隙水流模型试验及其机制初探[J]. *水利学报*, 1994, (5): 19 - 24.(Su Baoyu, Zhan Meili, Zhao Jian. The model test of the flow in smooth fracture and the study on its mechanism[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, (5): 19 - 24.(in Chinese))
- [13] 韩小妹, 王恩志, 刘庆杰. 低渗透岩石的单相水非 Darcy 流[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(6): 804 - 807, 811.(Han Xiaomei, Wang Enzhi, Liu Qingjie. Non-Darcy flow of single-phase water through low permeability[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(6): 804 - 807, 811.(in Chinese))
- [14] Brace W F. Permeability of crystalline and argillaceous rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1980, 17(5): 241 - 251.
- [15] Hsieh P A, Tracy J V, Neuzil C E, et al. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of "tight" rocks— I: theory[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(3): 245 - 252.
- [16] Lin W. Parametric analysis of the transient method of measuring permeability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(2): 1 055 - 1 066.
- [17] Oda M, Takemura T, Aoki T. Damage growth and permeability change in triaxial compression tests of Inada granite[J]. *Mechanics of Materials*, 2002, 34(6): 313 - 331.