



## 岩石渗透实验中试件内孔隙压力分布 及初次渗水时间的分析

莫钢廷

(兰州地震研究 兰州市盘踠路 730000)

吴景浓

(广东省地震局 广州市先烈中路 510070)

### 提 要

我们在实验室内采用稳态法测量了新丰江花岗岩的岩石渗透率,实验中采用圆形试件,用两种不同的注水方式使水通过试件渗流,一种是中心孔注水,水沿试件的径向辐射,另一种是从试件的一端注水,水沿试件的轴向传播。

在渗透实验中,从开始注水到从试件中渗透出水的时间是个重要参数,它往往与试件大小和试件本身的渗透率有关,本文用孔隙流体扩散理论计算了从注水开始到扩散达到稳定状态的时间,该时间与注水后渗透出水的时间基本相同,该结果为今后的稳态渗透实验提供了一种计算初次渗水时间的基本方法。

### 一、前 言

在研究岩石的力学性质时,不得不考虑岩石孔隙中流体的作用,并且在实验分析上对水在岩石中的力学作用进行一系列的分析研究。如加拿大学者E.Z.Lajtai等人在实验室内研究了水对花岗岩的时间相关变形与破裂的影响<sup>[1]</sup>,水对岩石的长时间作用对岩石的强度、形变过程、波速等都将发生明显的影响。在实验室内测定岩石的渗透率工作,国外在六十年代已经就发展起来了<sup>[2]</sup>,经过三十年来的实践探索,发现岩石渗透率会随着实验条件的变化而变化<sup>[3]</sup>,因此人们不断探索出新的实验方法、研制出新的实验设备。近来,美国麻省理工学院的Y.Bernabe设计出了一种测量范围很宽的渗透仪,它既能对高渗透率岩石采用稳态法测量,又能对低渗透率岩石采用瞬态法测量,测量岩石渗透率的范围达8个数量级<sup>[4]</sup>。该仪器还能



测量出岩石孔隙体积的变化。目前我们在室内进行渗透实验时, 由于实验条件的限制, 尚不能采用瞬态法测量渗透率特别低的岩石, 因此仅能采用稳态法测量中等和高渗透岩石, 采用稳态法测量时给岩石注水需要多长时间才能渗透出来, 过去一直没有作过研究, 因此本文根据实验中初次渗水时间的观测以及理论模拟计算的初次渗水时间, 给出一种合适的办法来估算。

## 二、岩石渗透实验方法简述

不论是采用稳态法还是瞬态法, 在测量岩石渗透率时都要求在岩石试件的两端给出注水压力和出水压力的压力差。在稳态法中, 保持注水压力的稳定及在岩石试件内部具有稳定的水流动是较为突出的问题, 其次就是如何使得注入的水沿着实验设计的路径流动而不向其它地方溢流, 在高水压下做渗透实验此问题更为突出, 由上述问题而需要研制出耐高压的渗透仪。在瞬态法中, 先要使得整个实验系统保持试件两端的注水压力平衡, 然后在试件的其中一端突然改变压力, 此后不需要使注入到岩石试件内的水达到稳定流动, 而只需要很短的时间来观测流体压力的衰减曲线, 其衰减形式近似为指数形式, 衰减时间的间隔与岩石试件的渗透率成正比, 即:

$$\delta p(t) \propto \exp(-\alpha t) \quad (1)$$

$$\alpha = [Ak(C_u + C_d)] / (\mu L C_u C_d) \quad (2)$$

其中  $p(t)$  是试件内的孔隙压力,  $\alpha$  是孔隙压力的衰减系数,  $A$ 、 $L$  分别是试件的横截面面积和试件的长度,  $k$  是试件的渗透率,  $\mu$ 、 $C_u$ 、 $C_d$  分别是水的粘滞系数、实验系统中上游和下游容器的压缩能力,  $C_u$ 、 $C_d$  的值由具体的实验系统而定。在 (1) 式中, 可采用对数坐标, 由  $\ln(\delta p(t)) \propto -(\alpha t)$  确定出衰减曲线  $\ln(\delta p(t)) \sim t$  的直线的斜率  $\alpha$ , 然后由 (2) 式便可求出渗透率  $k$ 。在瞬态法中对  $C_u$ 、 $C_d$  的大小有一定的限制,  $\delta p$  的幅度也最好不超过注水压力的 10%。

稳态法与瞬态法测量岩石渗透率时的主要区别在于, 前者要使注水压力系统稳定地向试件内输入流体水, 并要求在试件内达到稳流, 故实验时花费的时间较长, 反映流体在岩石中流动过程较为真实, 并能观测到流体水在岩体中长时间流动过程所发生的渗透率变化。而后者是在试件的一端产生一个压力脉冲, 只需要在短时间内观测压力脉冲之后的压力衰减曲线, 流体在试件内的流动时间很短。又由于两种方法测量岩石渗透率的范围不同, 在某一注水压力水平上若用稳态法测量渗透率特别低的岩石, 可能花费很长的时间也不能使水渗透出来。同样地, 用瞬态法测量渗透率高的岩石, 则可能因衰减时间太短而测量不准或测量不出衰减系数  $\alpha$ 。因此这两种方法应用的对象不同, 彼此不能兼容。

我们根据广东省新丰江水库区花岗岩属于中等渗透性岩石, 采用稳态法可以测定其渗透率。我们在实验中采用了两种注水方式 (如图 1 所示)。图 1 中的  $p_1$  为注水压力,  $p_2$  为出水压力。试件的高度为 10cm, 直径为 5cm。图 1a 为含中心孔试件, 内孔直径为 1cm, 中孔注水压力小于岩石自身的抗拉强度, 保证岩石注水以后不破裂, 图 1b 为实心试件、端部注水, 准备试件时在试件的外表涂有防止漏水的水中胶, 并且用乳胶橡皮套将试件包扎起来, 以使注入到试件中的水只能沿轴向流动, 当注水压力很高时需要大于  $p_1$  的围压作用才能保证试件的侧向密封。由于试验中岩石渗透出水的时间没有简单的方法可行, 因此需要进行数值计算。



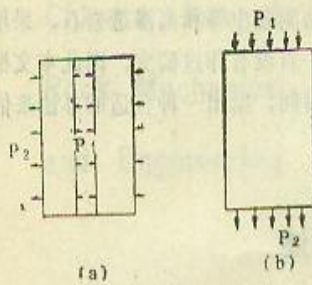


图1 岩石渗透实验的两种注水方式

Fig. 1 Two injecting water ways in experiment

a. 中心孔注水

(Injecting water into central bore)

b. 端面注水

(Injecting water into an end surface of sample)

### 三、渗透实验中观测到的初次渗水时间及理论模拟计算初次渗水时间

我们利用稳态法对岩石渗透率进行测量的实验系统、实验原理及实验结果曾有过专门的报道,在此就不赘述<sup>[5]</sup>。我们在实验中观测到的初次渗水时间见表1。

表1中的方式A、B分别对应于图1a、图1b中的方式。从表1中可以看出,对于一定几何尺寸的岩石试件,初次渗水时间与注水压力、围压和岩石本身的渗透率密切相关。为了能够从理论上预算出渗透时间,我们认为应该用孔隙压力的扩散过程来分析。具体地说,岩石试件内部在注水以前的初始孔隙流体压力为零,一旦注水压力压上以后,孔隙压力就从高压处扩散到低压处,当扩散过程达到稳定以后,渗透水就从试件内渗透出来,

因此估算扩散达到稳定所需要的时间就是初次渗透出水的时间。下面我们就根据上述设想进行理论计算。

表1 岩石渗透实验的初次渗水时间

Tab. 1 Initial time of permeated water from the sample in experiment

试件	方式	压力差 (MPa)	围压 (MPa)	初次渗水时间 (min)	平均渗透率 ( $\times 10^{-6}$ darcy)
G-04	A	2.1	0.1	10	2.24
G-08	A	2.1	0.1	15	1.46
G-09	A	2.1	0.1	60	0.39
G-17	B	9	10	1680	0.05

#### 1. 中心孔注水

在图1a中的水扩散问题中,假设试件的渗透性质是均匀且各向同性,该问题具有轴对称性质,故可用下面的一维坐标系下的扩散方程来描述:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C \left( \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad a \leq r \leq b \quad (3)$$

其中a为试件的内孔半径、b为试件的外孔半径,c为岩样的扩散率。该问题的初始条件和边界条件是:

$$p(r, t) \Big|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

$$p(r, t) \Big|_{r=a} = P_1 \quad (5)$$

$$p(r, t) \Big|_{r=b} = P_2$$

在条件(4)、(5)式下(3)的解为<sup>[6]</sup>:



$$p(r, t) = -\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[p_2 J_0(a\alpha_n) - p_1 J_0(b\alpha_n)] J_0(a\alpha_n) U_0(r\alpha_n)}{J_0^2(a\alpha_n) - J_0^2(b\alpha_n)} \cdot e^{-\alpha_n^2 t} + \frac{p_1 \ln(b/r) + p_2 \ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad (6)$$

其中

$$U_0(\alpha r) = J_0(\alpha r) Y_0(ab) - J_0(ab) Y_0(\alpha r) \quad (7)$$

$J_0(x)$ 、 $Y_0(x)$  分别是零阶Bessel函数和零阶Neumann函数。 $\alpha_n$  是满足  $U_0(a\alpha) = 0$  或  $U_0(ab) = 0$  的本征值,  $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ 。我们采用区间套方法求解出方程(7)的根。

在方程式(6)中, 孔隙压力  $p(r, t)$  可分解成两部分, 即  $p(r, t) = p_I(r, t) + p_{II}(r)$ , 其中  $p_I(r, t)$  是解的动态变化部分(方程式(6)中右边的第一项部分)、 $p_{II}(r)$  是解的稳定部分(方程式(6)中右边第二项)。

在计算中给出  $C$  值及时间  $t$ 、距离  $r$  后便能计算出  $p(r, t)$  的扩散过程曲线, 计算的精度控制在  $10^{-4}$  以内, 当  $|p(r, t) - p_{II}(r)| < 10^{-4}$  时, 我们就认为扩散过程达到了稳定, 此时的时间  $t$  就是初次渗水的时间。为了计算上的方便起见, 我们选取了  $p_N = \frac{p(r, t)}{p_1}$  这个无量纲的量来进行计算。对于我们实验中的新丰江花岗岩, 扩散率  $C$  与渗透率  $k$  之间的换算关系为  $1 \text{ cm}^2/\text{sec} \approx 10^{-13} \text{ m}^2$ , 图2是对试件G-04的计算结果, 图2中纵坐标代表归一化后的孔隙压力  $p_N = \frac{p(r, t)}{p_1}$ , 计算的初次渗水时间与实验中观测到的结果基本一致。其它两个

试件的实验中, 其结果也吻合得较好。例如G-08试件, 它的扩散率与初次渗水时间的乘积为  $15 \times 1.46 = 22.1$  (见表1), 与G-04试件的结果  $10 \times 2.24 = 22.4$  基本相同, 在G-09试件中该乘积为  $60 \times 0.39 = 23.4$  也是大致相同的。从(6)式中可知, 当在相同的注水压力条件下,  $p(r, t) \sim e^{-\alpha_n^2 c \cdot t}$ , 只要扩散率与时间的乘积  $c \cdot t$  相同, 则孔隙压力扩散的动态部分就相同, 因此我们认为初次渗水的时间就是孔隙压力扩散达到稳定所需要的时间。

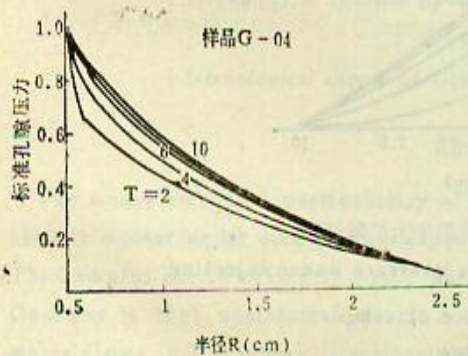


图2 中心孔注水渗透情形下孔隙压力扩散过程

Fig.2 Diffusive process of pore pressure under injecting water into central hole

$c = 2.24 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 时间步长 = 2min

$T = 2, 4, 6, 8, 10$  分钟

$c = 2.24 \text{ cm}^2/\text{s}$

Time step = 2min.

$T = 2, 4, 6, 8, 10$  min.

## 2. 端部注水

如图1b所示的注水方式中, 假设岩石试件的渗水性质是各向同性且是均匀的, 可用一维有限长的杆扩散问题来描述:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (8)$$

该问题具有的初始和边界条件分别为

$$p(x, t) \Big|_{t=0} = p_0 = 0 \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} p(x, t) \Big|_{x=0} &= p_1 \\ p(x, t) \Big|_{x=1} &= p_2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

\* 渗透率的量纲为  $(L^2)$ ,  $1 \text{ darcy} \approx 10^{-12} \text{ m}^2$



求解得:

$$p(x,t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(p_1 - p_0)}{n\pi} [(-1)^n - 1] + \frac{(p_2 - p_1)}{n\pi} (-1)^n \right\} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \cdot e^{-\frac{n^2 \pi^2}{l^2} c^2 \cdot t} + p_1 + \frac{p_2 - p_1}{l} x \quad (0 \leq x \leq l) \quad (11)$$

其中  $n=1, 2, 3, \dots, \infty$ . (11) 式中右边可分解成两部分:  $p(x,t) = p_I(x,t) + p_{II}(x)$

$$p_I(x,t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(p_1 - p_0)}{n\pi} [(-1)^n - 1] + \frac{(p_2 - p_1)}{n\pi} (-1)^n \right\} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \cdot e^{-\frac{n^2 \pi^2}{l^2} c^2 \cdot t}$$

$$p_{II}(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{l} x \quad (0 \leq x \leq l)$$

$p_{II}(x)$  是解的稳定部分, 它呈线性分布.  $p_I(x,t)$  是解的动态部分, 它随时间增大而衰减, 当  $t \rightarrow \infty$ ,  $p(x,t) \rightarrow p_{II}(x)$ . 图3是G-17试件的计算结果. 图3中的纵坐标代表归一化后的孔隙压力值. G-17试件的初次渗水时间约为1680min, 而实际计算结果约为2000分钟, 误差约20%以内, 说明此方法仍可采用.

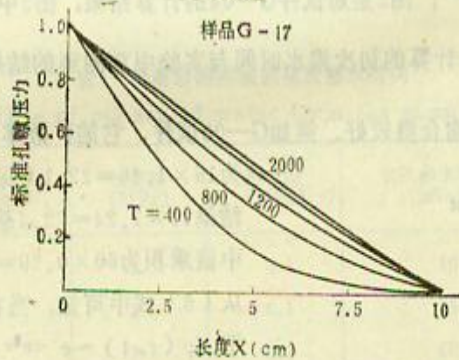


图3 端部注水渗透情形下孔隙压力扩散过程

Fig.3 Diffusive process of pore pressure under injecting water into an end surface of sample

$c=0.05\text{cm}^2/\text{s}$ , 时间步长=400min

$T=400, 800, 1200, 1600, 2000\text{min}$

$c=0.05\text{cm}^2/\text{s}$ . Time step=400min.

$T=400, 800, 1200, 1600, 2000\text{min}$ .

#### 四、结 论

在稳态法测量岩石渗透率的实验中, 岩石注水以后的初次渗水时间可用孔隙压力扩散达到稳定的时间进行估算. 初次渗水时间明显与试件的水力扩散率、水传输所经过的路程有关, 因此在实验中针对所采用的岩类、试件的几何尺寸可对初次渗透出水时间进行预算. 在工程环境下的岩体渗透过程, 如井孔注水可采用本文中提出的方法估算距离井孔一定位置上



的初次出水时间。该方法在地热能的应用中具有实际意义, 也为稳态法测定岩石渗透率的实验中估算初次出水时间一种可行的方法。

由于本文采用的实验模型是一维的各向同性且均匀的渗透介质, 使计算得以进行。进一步需要研究流体在边界处的非光滑壁的流动效应, 因而还需进一步完善二维扩散理论, 以使初次渗水时间更为精确。

( 本研究得到地震科学联合基金资助。 )

### 参 考 文 献

- (1) Lajtai EZ, et al., The effect of water on the time-dependent and fracture of a granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1987; 24(4): 247—255
- (2) Brace WF, et al., Permeability of granite under high Pressure, *J. G. R.*, 1968; 73(6): 2225—2236
- (3) 龚钢延, 谢原定. 岩石渗透率变化的实验研究. *中国岩石力学与工程学报*, 1989; 8(3): 219—227
- (4) Bernabe Y. A wide range permeability for use in rock physics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1987; 24(5): 309—315
- (5) 吴景浓等. 岩石渗透特性的实验研究. *西北地震学报*, 1989; 11(1): 59—67
- (6) Carslaw HS, et al., *Conduction of heat in solid*, Oxford: Clarendon Press, 1959: 207

## Pore Pressure Distribution and Analysis on Initial Time of Water Permeation from Sample in Experiment Conditions

Gong Gangyan

( *Seismological Institute of Lanzhou, S.S.B., Lanzhou, 730000* )

Wu Jingnong

( *Seismological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou, 510070* )

### Abstract

The measurement on permeability of Xingfengjiang granite, Daye marble and cement mortar under steady-state flow method has been completed in laboratory. The samples are in cylindric shape. There are two different injecting water ways. One way is that upstream injects into the central bore through sample and water flows in the radial direction. Another way is that upstream injects into one end face of the sample and water flows in the axial direction. In these ways, the distributions of pore-fluid pressure obtained are obviously distinct. In the latter way, after reached steady-state flow the distribution of pore pressure is decrease with flow path in linearity.

The interval time from injecting water to permeating water out of sample is an important parameter. This interval is related to magnitude of injecting pressure and permeability. A method is to be used to calculate the interval from begining of injecting to reaching steady-state flow by the theory on diffusion of pore fluid. The interval time results in calculation are about the same as in experiment. The method presented can serve to estimate the initial interval time after injecting water under steady-state flow.