

# 低渗透软弱岩非达西渗流拟启动压力梯度试验研究

徐德敏<sup>1</sup>, 黄润秋<sup>1</sup>, 邓英尔<sup>1</sup>, 聂衍钊<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072)

**摘要:** 利用新开发的高压渗流仪, 对大尺寸低渗透性软弱岩进行了系统的试验测试。试验渗透压差波动幅度仅为 0.01MPa, 渗出端溶液体积变化量测试精度可达 0.05ml。通过溶液体积变化与时间的线性关系, 稳定渗流量大小可以精确测定。以稳定压差、流量法(即稳压法), 试验验证了低渗透岩石的非达西渗流现象。并根据非达西流线性段的渗流特点, 采用三种方法推算了拟启动压力梯度值, 并通过实例说明“二次平均法”是拟启动压力梯度推算的最有效方法。

**关键词:** 非达西流; 拟启动压力梯度; 稳压法; 渗透系数; 二次平均法

**中图分类号:** P641.73; P631.6<sup>+</sup>21

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3665(2008)03-0057-04

达西定律表示压力损失完全由粘滞力决定, 因此, 如果流体在多孔介质中渗流时的压力损失不完全表现为粘滞阻力, 则该渗流就不服从达西定律而表现为非达西渗流。

本文应用新研制的大型岩石高压渗透仪, 采用“稳压法”, 对低渗透孔隙介质进行了系统的试验测定, 并根据非达西流直线段的渗流特点, 提出了拟启动压力梯度的推算方法。

渗流启动压力梯度的研究将对地下水科学, 油气田的开发, 水电建设、矿山等工程的实际运用有重要意义。

## 1 非达西渗流特性测定

### 1.1 岩石渗透性测试方法

室内渗透实验方法可分为两大类:(一)是在试件两端施加一定或变化的水压差, 通过测量渗透流量来计算试件的渗透系数, 传统的定水位和变水位法即属于此类;(二)是向试件的一端以一定的流量注水或直接施加压力脉冲, 通过测量试件两端间压力差随时间的变化来计算试件的渗透系数<sup>[5-7]</sup>。受试验仪器的限制, 对低渗透性岩石的测定, 往往需要较长的测试时间。压力脉冲法虽然可以节省试验时间, 但该方法

根据水压力平衡与时间的关系来测试试样的渗透性, 它忽略了渗流液体和岩石孔隙的压缩性, 管路的变形及管路的泄漏。由于压差传感器的精度相对较低, 试验若持续时间长必然影响测试结果。

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开发研制了大型岩石高压渗透试验仪, 该装置可在某一围压、轴压条件下, 在试样两端提供稳定的水压差(即稳压法), 通过测量渗出端水体积的变化量(简称“体变量”), 根据体变量与时间呈直线关系段计算得到其稳定渗流量, 进而用达西公式计算出试样的渗透系数。

依靠稳压阀, 用计算机控制并自动采集数据, 某一试验条件岩石渗透性实测结果如图 1 所示。从图中可以看出, 渗透水压差在 15 分钟的测试时间内波动幅度在 0.01MPa 以内, 稳定效果很好。渗出端水体积的变化与时间基本呈直线关系, 说明渗流速度基本达到稳定值。当渗透水压差、渗流速度均为稳定值时, 可以认为该时间段内渗透系数可用达西公式求解。根据反复试验调试, 在产生稳定渗流后(整体的渗流端面已经形成)的某一试验条件下, 只需十几分钟甚至几分钟即可获得相应条件下的渗透系数。

### 1.2 稳压法非达西流试验测定

岩石渗透性测试时, 需在较高的压力梯度下形成稳定的渗流端面(即稳定渗流)。根据所测试件的渗透性、储水性、尺寸大小及渗透水压差的大小等因素, 达到稳定渗流所需时间长短不一(十几分钟到几个小时)。非达西渗流的测定, 是保持在一定的轴压、围压条件下, 改变渗透水压差的大小进行渗流速度的测定。当渗流出水口端产生稳定渗流后, 在每一个压力梯度

收稿日期: 2007-04-20; 修订日期: 2007-05-31

基金项目: 国家自然科学基金雅砻江水电开发联合研究基金重点资助项目(50539050)

作者简介: 徐德敏(1971-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程研究。

E-mail: xudemin2004@163.com

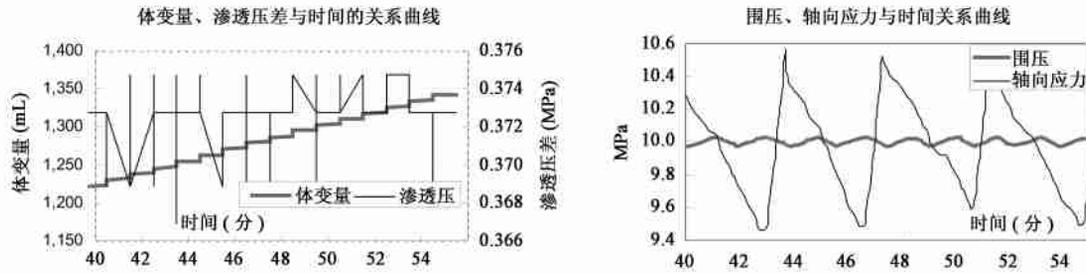


图 1 轴压、围压为 15MPa 下渗透水压差 0.4MPa 时实测结果图

Fig. 1 0.4 MPa penetration water pressure test result map under 15 MPa surround pressure

下均能得到如图 1 所示的体变量与时间的近似直线关系曲线,进而计算得到相应条件下渗流速度。然后改变压力梯度值,进行下一步测定。

试验岩样采用西南某水电站坝肩抗力体边坡中不同蚀变程度的软弱岩(基本无肉眼可见裂隙,可按孔隙介质考虑,其渗透系数一般在  $10^{-5} \sim 10^{-9} \text{ cm/s}$  之间),利用万能岩石切割机钻取直径为 10cm,高度不等的试

样,采用当地水样(呈弱碱性)进行非达西渗流试验测定。共得到 18 组不同孔隙度,不同高度试样的测试结果,其中 85 - 1、15 - 4 号试样的测试结果如图 2、图 3 所示。试验证明,在低压力梯度段,渗流速度与压力梯度关系曲线呈现非线性特征,随着压力梯度的增加,曲线由非线性关系向线性(均不通过坐标原点)过渡。

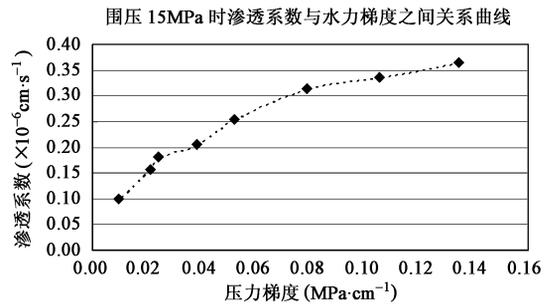
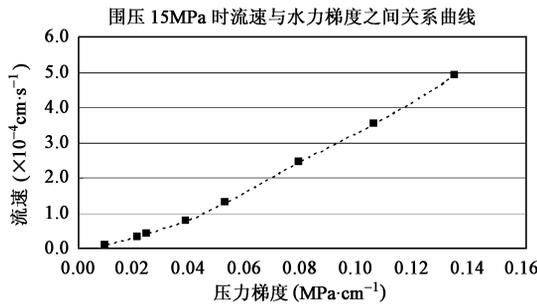


图 2 85 - 1 号样渗流速度、渗透系数与压力梯度关系曲线

Fig. 2 Relationship of seepage velocity, permeability coefficient and water pressure gradient, sample 85 - 1

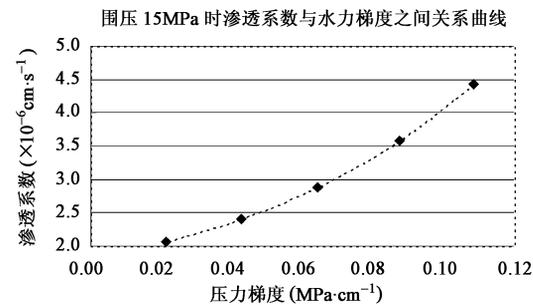
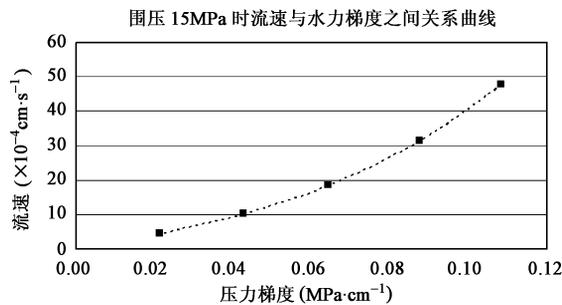


图 3 15 - 4 号样渗流速度、渗透系数与压力梯度关系曲线

Fig. 3 Relationship of seepage velocity, permeability coefficient and water pressure gradient, sample 15 - 4

当在某一压力梯度下,测得的渗流速度为稳定值时,可认为该时段渗流特征满足达西定律,可以用达西公式求出其渗透系数。从试验结果(图 2、图 3)可以看出,不同渗透性能岩石渗流的共同特点是岩石的渗透系数与压力梯度均呈正相关关系,当压力梯度与渗流速度曲线处于线性段时,渗透系数变化量相对减小;但总体上随压力梯度的增大而增大。这也是非达西流直

线段延长线不经过坐标原点的一个原因。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 拟启动压力梯度推算方法

启动压力梯度是低渗透岩发生渗流的最小压力梯度,其值难以试验测定,也难以数值计算获得。根据非达西流的曲线特点,拟启动压力梯度可通过流速与压

力梯度近直线段的实测数据,采用作图法进行推算。为简化推算过程,提高其精度,笔者尝试采用数学公式法进行计算获取。

#### 第一种方法:一次平均法

关于非达西渗流的运动方程有多种表达形式,比较有代表性的有:

$$V = \begin{cases} K(J - J_0) & J > J_0 \\ 0 & J < J_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$V$ ——实测渗流速度(cm/s);

$J$ ——实测压力梯度值(MPa/cm);

$K$ ——直线段的斜率,为一不变量,为区别上面每一测试点利用达西公式计算得到的渗透系数,这里把它称之为绝对渗透系数(cm/s);

$J_0$ ——拟启动压力梯度值(MPa/cm)。

当  $J > J_0$  时,可以直接求出:

$$J_0 = (V_2 J_1 - V_1 J_2) / (V_2 - V_1) \quad (2)$$

通过上式计算得到多组  $J_0$  值,以最高压力梯度下相邻两组数据得到的  $J_0$  值为参考值,把偏差较大的测试点剔除,然后重新排序,再次按公式(2)进行计算,把所有计算结果取平均即得到最终  $J_0$  值。这种一次取平均推算拟启动压力梯度  $J_0$  的方法,本文简称为一次平均法。

#### 第二种方法:二次平均法

把公式(1)做简单的变换,写成  $V = KJ - V_0$  的形式(其中  $V_0$  为一常量,单位 cm/s),则在不同压力梯度下有:

$$V_i = KJ_i - V_0 \quad (3)$$

其中,  $i$  表示测试的序次,由此得:

$$K = (V_i - V_{i-1}) / (J_i - J_{i-1}) \quad (4)$$

则:

$$J_0 = \frac{V_0}{K} \quad (5)$$

对某一实测岩样,具体推算步骤如下:

(1)对测试样品,按不同压力梯度得出多组  $V, J$  值,把相邻两组实测数据根据公式(4)计算出  $K$  值;

(2)按最高压力梯度下相邻两组数据得到的  $K$  值为参考值,把偏差较大测试点剔除,然后重新排序,再次按公式(4)计算出  $K$  值;

(3)若还有偏差较大的点,需按上面步骤再次重新排序计算  $K$  值。然后把所有计算结果平均即得到所要的  $K$  值,也就是线性段的斜率;

(4)再根据  $K$  值,把参与统计计算的所有实测值按公式(3)计算出相应条件下的  $V_0$  值,再进行取平均计算,即得最终  $V_0$  值;

(5)最后根据公式(5)计算出拟启动压力梯度  $J_0$ 。

这种方法首先确定  $K$  值,再根据  $K$  值大小确定  $V_0$  值,两次取平均推算拟启动压力梯度  $J_0$  的方法,本文简称为二次平均法。

### 3.2 拟启动压力梯度实测分析

对不同渗透性的试样,按上述三种方法进行了拟启动压力梯度值的推算。从表1的推算结果可以看出,用上述二次平均法较作图法和一次平均法得到的拟启动压力梯度值规律性强,即随被测试试样渗透性越小,其拟启动压力梯度越大,这与理论分析相吻合<sup>[4]</sup>。

由于试验测试精度等原因,会使测到的  $V, J$  值有较大偏差,作图法与一次平均法难以对所测试数据进行有效取舍,对处于非线性段的数据,也难以有效界定。而二次平均法,首先确定非达西流直线段斜率(即  $K$  值),再根据  $K$  值计算相应  $V_0$  值,使所获得的  $J_0$  值误差大大降低,试验验证是一种有效的拟启动压力梯度推算方法。

表1 围压10MPa下不同渗透特性试样拟启动压力梯度实测结果

Table 1 Quasi-threshold pressure gradient test result of different permeability sample under 10 MPa

室内编号	16-2	15-3	85-1	A-1
绝对渗透系数 (cm/s)	$4.25 \times 10^{-6}$	$2.45 \times 10^{-6}$	$2.40 \times 10^{-7}$	$5.28 \times 10^{-8}$
作图法 (MPa/cm)	$1.23 \times 10^{-2}$	$3.75 \times 10^{-2}$	$2.09 \times 10^{-2}$	$7.00 \times 10^{-2}$
一次平均法 (MPa/cm)	$1.22 \times 10^{-2}$	$3.95 \times 10^{-2}$	$2.18 \times 10^{-2}$	$7.97 \times 10^{-2}$
二次平均法 (MPa/cm)	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.67 \times 10^{-2}$	$2.07 \times 10^{-2}$	$7.17 \times 10^{-2}$

### 3.3 非达西渗流机理分析

对非达西渗流产生的原因,有大量的文献做了相关研究。概括起来影响因素主要有<sup>[1-4]</sup>:多孔介质的孔隙结构,孔隙介质与流体之间的相互作用和流体性质。

孔隙大小、孔隙喉道几何结构及其分布都会影响其中流体的渗流速度。渗透系数的贡献值主要由占孔隙体积比例小的、较粗的孔道提供。而孔隙较小、喉道较细、孔隙连通性差是造成低渗透非达西渗流的重要因素。

由于测试岩块不同程度含有粘土矿物,其具有一定的水敏特性<sup>[5]</sup>。粘土矿物吸水后会产生膨胀变形,还可能沿层理分裂为碎片,或在流体流动剪切力的作用下,

把粘附在岩石颗粒上的粘土絮解成更为细小的颗粒。无论是增大了体积的矿物颗粒,还是分裂或絮解下来的粘土矿物碎片,都会增大流体流动阻力,堵塞一部分流体流通孔道。此外,在渗流过程中,粘土矿物微粒随流体在孔道内流动时,当流经颗粒之间所形成的孔隙喉道处,孔道壁的粗糙部位以及当流体流动方向发生变化时,均可造成不同形式堆积堵塞,阻挡流体的流动,降低孔隙介质的渗透率,从而使启动压力梯度增加。

水通常可以认为是牛顿流体,但是,当它在很细小的孔道中流动时就显示出了非牛顿特征,即呈现出非达西渗流特征,具有启动压力梯度。

#### 4 结束语

(1) 利用新开发的高压渗流仪,对大尺寸低渗透性软弱岩进行了非线性渗透性测试研究。试验采用稳压法,可以真实地模拟岩块所处的高地应力、高孔隙水压力条件下小水力梯度渗流特征。试验精度高,渗透水压差波动幅度可控制在 0.01MPa,流量测定采用出水端渗流液体体积变化量与时间的线性关系通过简单计算得到。每一压力梯度条件下,测试时间只需十几分钟,避免了测试过程中物理化学变化及温度变化等因素的影响。对低渗透岩非达西渗流现象研究提供了一个有效的试验手段。

(2) 试验证实了低渗透岩非达西渗流现象是普遍

存在的。

(3) 根据其非线性曲线特点,提出了拟启动压力梯度的推算方法,并通过实例说明,“二次平均法”是拟启动压力梯度推算的最有效方法。

(4) 拟启动压力梯度的试验测试研究成果将对评价工程岩体的水力学特性、工程防渗处理及石油开采工程等具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 李中锋,何顺利. 低渗透储层非达西渗流机理探讨特种油气藏,2005,12(2):35-38.
- [2] 李道品. 低渗透油田开发[M]. 北京:石油工业出版社,1994.
- [3] 邓英尔,闫庆来,马宝歧. 表面分子对低渗多孔介质中液体渗流特征的影响[A] 渗流力学进展[C]. 北京:石油工业出版社,1996,9.
- [4] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京:石油工业出版社,1998:59-99.
- [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(Supp.1):3098-3103.
- [6] 韩小妹. 低渗透岩石非 Darcy 渗流实验研究[D]. 北京:清华大学工学硕士学位论文,2004.
- [7] 张铭. 低渗透岩石实验理论及装置[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(6):919-925.

## Non-Darcy flow quasi-threshold pressure gradient experimental study for low permeability soft rock

XU De-min<sup>1</sup>, HUANG Run-qiu<sup>1</sup>, DENG Ying-er<sup>1</sup>, NIE Yan-zhao<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of SPC, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** With unchangeable water pressure method, big size and low permeability soft rocks have been systematically tested with the new equipment called High Pressure Permeability Testing Machine in Lab. The penetration water pressure fluctuation scope only is 0.01 MPa, and the seepage exit water volume testing precision is 0.05ml. According to linear relationship of water volume and time, seepage quantity can be accurately calculated. The test results demonstrate that the non-Darcy flow phenomena are applicable for low permeability rocks. On the basis of the linearity seepage characteristics of non-Darcy flow, the quasi-threshold pressure gradient has been calculated with three methods. And it is proved that Averaged Two Times Method is the best one through examples.

**Key words:** non-darcy flow; quasi-threshold pressure gradient; unchangeable water pressure method; permeability coefficient; averaged two times method

责任编辑:王宏