

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-2961-04

岩石（体）渗透性测试的体变量法研究

黄润秋, 徐德敏

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点试验室, 成都 610059)

摘要: 渗透性测试试验一般采用直接测渗流量的方法, 难以对低渗透岩有效测定流量。利用新开发的高压渗透仪, 采用“体变量法”进行渗透性测试, 该法是通过精确计量渗透出水端水体积的变化量 (最小有效测试精度可达 0.03 mL) 度量岩石 (体) 渗流量的大小。保持渗透水压差不变, 当出水端水体积变化与时间呈线性关系时, 即该时段渗透速度保持不变, 则该时段试样渗透特性符合达西定律, 可利用达西公式对试样渗透性指标进行分析计算。采用这种方式, 即使是针对超低渗透性岩石 (渗透系数小于 10^{-9} cm/s), 在整个渗透端面形成以后, 某一条件下渗透性测试仅需十几分钟甚至几分钟, 大大缩短了测试时间, 提高了测试精度。试验证明该方法是一种有效的测试方法。

关键词: 渗透系数; 体变量法; 渗流量; 磁致伸缩性位移传感器; 渗透速度

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Volume change method for testing rock or rock mass permeability

HUANG Run-qiu, XU De-min

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

Abstract: It is usually directly to test seepage quantity in the laboratory, which is difficult to accurately measure for low permeability rocks. In this paper, the volume change method has been used with the new equipment called high pressure permeability testing apparatus in lab. This method can exactly measure the seepage water volume change quantity (the least effective test precision is 0.03ml). When the seepage water pressure difference is unchangeable, the stable penetration flow phase can be ascertained according to the linear relationship between seepage water volume change quantity and time, which can be considered satisfying the Darcy's law; and the Darcy's formula can be used. Using this method, even the ultra-low permeability rocks, whose permeability coefficient less than 10^{-9} cm/s, when the whole seepage section was formed, the test time was just more than ten minutes or several minutes. This method can save the test time greatly and improve the precision. Test results demonstrate it is an effective permeability test method.

Key words: permeability coefficient; volume change quantity method; seepage quantity; magnetostrictive displacement sensor; infiltration velocity

1 引言

按照试验原理, 室内渗透性测试方法可分为两大类^[1]: 一类是在试件的两端施加一定或变化的水压差, 通过测量渗透流量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。另一类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测定岩石的渗透性, 不需要测量流量, 从而避免用常规方法测量流体通过致密岩石时微小流量计量的困难。近年来随着对低渗透岩的深入研究, 瞬时压力脉冲法

被广泛认可和采用, 国内外对岩石渗透性, 尤其是低渗透性岩石的研究大都采用这一方法^[2-4]。这一特性使得后一类试验方法比前一类方法节省不少试验时间, 但在测试低渗透试件时仍然需要较长时间。根据试件的渗透性、储水性、试件尺寸及试验装置本身的压缩储水性能的大小, 试验时间可短至几分钟或几小时, 长则几天乃至几十天, 而且它根据水压力平衡与时间的关系测试试样的渗透性, 忽略了试样中流体及岩石孔隙的可压缩性、管路变形及泄漏等。

渗透性测试最大的技术困难是渗流量的测定,

收稿日期: 2008-05-27

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 (No. 50539050)。

第一作者简介: 黄润秋, 男, 1963年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程和岩土工程教学科研工作。E-mail: hrq@cdut.edu.cn

对其精确地测定、缩短渗透性测试时间和提高测试精度起到至关重要的作用。渗流量的测试方式一般是采用高灵敏度流量传感器,但其测试精度有限,一般大于 180 mL/min。《煤和岩石渗透系数测定方法》^[5]中采用量筒测量某一段时间的渗水量进而换算出相应时间段内的渗流量,但这种方法难以对微小流量进行精确测量。张铭等^[1]设计的通用试验装置采用高性能流泵,其在定流量控制条件下可以以每分钟 0.000 01 mL 到 50 mL 间任意设定的流量速度注水或抽水,控制误差为 3%。中国石油勘探开发研究院提高石油采收率研究所油层物理试验室引进的美国岩心公司生产的 FDES-641 驱替评价系统,其驱替泵的控制测试流量范围为 0.0012~15.0 mL/min^[6]。这两种手段虽然可以精确测到微小的渗流量,但仪器精度要求太高,不易长时间稳定控制,难以普遍推广。

本文提出了一种精确测定渗出水体积变化的“体变量法”进行岩石(体)渗透性测试,为缩短渗透性测试时间和提高测试精度提出了一种有效的实用方法。

2 体变量法渗透性测试原理

为解决微小渗流量测定的问题,本文提出了通过精确测量渗出水体积的变化来度量渗流量的大小。该原理是在渗透出水端采用不同规格尺寸的特制圆柱体钢桶,内接相应可精确测量水浮动变化的位移传感器,通过位移变化与钢筒内径横截面积的乘积即可得到水体积变化的精确值。

本次采用康宇公司生产的 KYCM-L 系列磁致伸缩性位移传感器(简称“磁尺”,见图 1)对位移变化进行准确测量,通过位移变化(渗出水的上升高度)与钢桶的横截面积的乘积即可精确算出水体积的变化量。

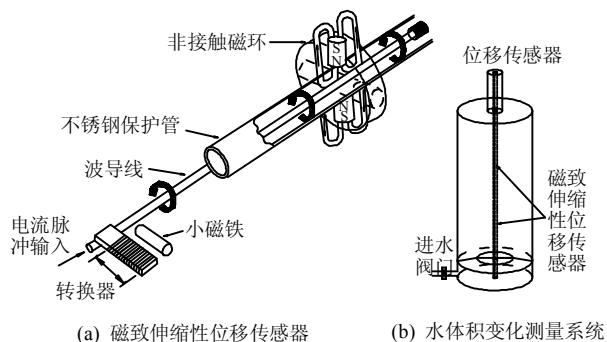


图 1 体积变化测试系统示意图

Fig.1 Sketch map of volume change test system

磁致伸缩性位移传感器由测杆、电子仓和套在测杆上的非接触的磁环组成,具有非接触测量、测量精度高、输出真正绝对位置和不需定期重标等优点。测杆内装有磁致伸缩线(波导线),工作时(水进入时),由电子仓内的电子电路产生脉冲,此起始脉冲在波导线中传输时,同时产生一沿波导线方向前进的旋转磁场。当旋转磁场与磁环中的永久磁场相遇时,产生磁致收缩效应,使波导线发生扭动,这一扭动被安装在电子仓内的拾能机构所感知并转换成相应的电流脉冲,通过电子电路计算出两脉冲之间的时间差,即可精确测出被测的位移,进而换算出相应的水体积的精确变化量。磁致伸缩性位移传感器通过了康宇测控仪器仪表工程有限公司质量检测,测试精度可达 0.001 mm,线性度为 0.050 5%,最大误差为 2.5×10^{-3} ,量程范围为 0~210 mm。而各种规格的特制钢桶内直径大小,是由通过中国测试技术研究院所标定的量具进行量测,测试精度可达 0.01 mm。通过试验测定,按不同规格体变测量仪满量程进行实时校对,即加入的水量与量测的结果相对比,测试结果在允许误差范围之内。

由于渗出水管路为密封系统,钢桶内浮标以下处于半真空状态,而且每种状态下渗透性测试时间只需十几分钟甚至几分钟,渗出水蒸发的问题可以忽略不计。采用这种方法,解决了对微小渗流量的准确计量,大大缩短了渗透性测试时间,提高了测试精度。

根据不同岩性渗透性的特点,可设计不同规格尺寸的圆柱体钢桶。笔者研发的仪器出水端采用 5 种规格尺寸的体积测量仪,量程范围分别为 0~100、0~250、0~1 000、0~2 000、0~20 000 mL,相应水体积有效测试精度分别为 0.03、0.05、0.19、0.25、2.18 mL。

对于微小的渗流量,可通过渗出端水体积的变化量呈稳定增长(体变量与时间呈直线关系)判断渗流速度是否达到稳定值。这种以渗透出水端水体积变化量确定达到稳定渗流时间段的方法本文简称“体变量法”渗透性测试。在渗透水压差、渗流速度均为稳定值时,认为该时段内渗流特点符合达西定律,得出该段时间相应条件下的渗透系数。

3 试样渗透性测试

3.1 渗透系数计算公式

试验渗透系数计算根据达西公式,用流体通过岩样的流量 Q 及其两端的渗透水压差 ΔP 等参数测量渗透系数。渗透性测试试验装置如图 2 所示,若

选择 A 点为针对试样发生渗流时的基准面，根据水力学的原理，试样实际所受的总水头差为： $H_1 + P_1/r + v^2/2g$ ，其中 H_1 为针对 A 点位能； P_1/r 为压能； $U^2/2g$ 为动能。因为流过试样的实际流速 U 一般很小，渗流计算时可忽略流速的影响，则计算公式（其中 $H_1 = 35$ cm）为

$$K = \frac{v}{J} = \frac{QL}{A(100P_1/r + 35)} \quad (1)$$

式中： K 为渗透系数（cm/s）； v 为渗透速度（cm/s）； J 为压力梯度，无量纲； Q 为流体通过试样的流量（ml/s）； A 为试样的截面积（cm²）； P_1 为进水端水压表的读数（MPa）； r 为测试液体的重度，这里按 $r = 10$ kN/m³ 计算； L 为试样的长度（cm）。

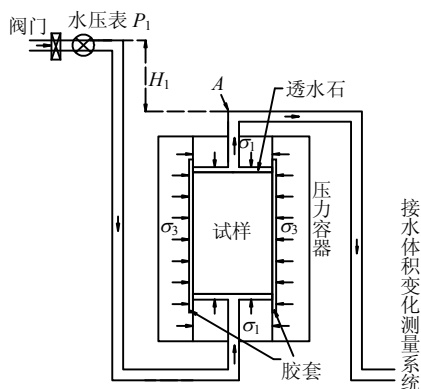


图 2 渗流应力耦合试验示意图

Fig.2 Sketch map of seepage flow and stress coupling test

3.2 渗透性测试实例

按上述试验步骤，针对西南某水电工程坝肩抗力体的多孔状蚀变岩（无肉眼可见裂隙，可按孔隙介质考虑）进行了一系列渗透性测试。图 3 为针对试样 20—3 号围压为 6 MPa、渗透压为 5.0 MPa 下渗透性实测结果。从图上可以看出，体变量与时间关系曲线基本为一条直线，说明在所测试时间段内通过试样的渗透速度基本不变；而渗透压波动幅度基本在 0.02 MPa 以内，渗透压差基本保持不变，即该时段满足达西定律。图 4 为根据实测数据，统一按这段测试数据起始时间算起，以不同的截止时间段，按式（1）计算得到的渗透系数值与相应测试时间段柱形图。

从测试结果看，90.7 min 测得的渗透系数值与 10.1 min 测试的结果相差不大。以同样方法，针对强渗透岩试样 16—2 进行了在保持围压为 10 MPa，渗透压差为 0.29 MPa 条件下的近 2 h 渗透性测试，对测试结果按不同截止时间段进行了统计计算，见

表 1。从表中数据可以看出，5.13 min 测得的结果已可以代表该条件下的渗透特性。经过反复试验调试，该法对强、弱渗透岩测试效果均较好，而且试验时间只需十几分钟甚至几分钟即可获得其相应条件下的渗透性指标。

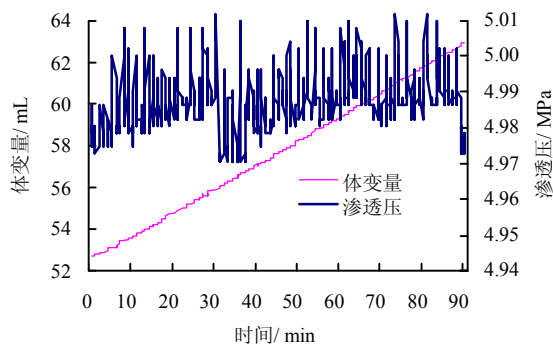


图 3 渗透压、体变量与时间关系曲线

Fig.3 Relationship of penetration stress, water volume change quantity with test time

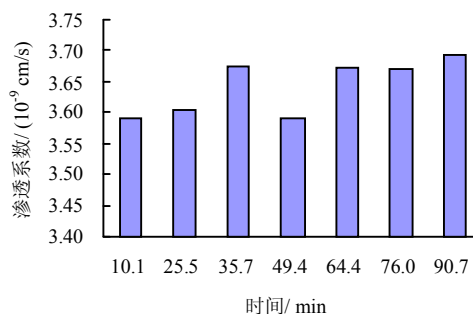


图 4 渗透系数与测试时间柱形图

Fig.4 Relationship of permeability coefficient with test time

表 1 不同截止时间段渗透性测试数据统计表

Table 1 Statistics of different end time phases permeability test results

渗透压 / MPa	体变量 / mL	测试时间 / min	渗透系数 / (10 ⁻⁶ cm/s)	渗透速度 / (10 ⁻⁴ cm/s)
0.29	20.0	5.13	3.74	8.12
0.29	70.0	17.65	3.82	8.42
0.29	190.0	49.22	3.74	8.20
0.28	290.0	74.27	3.80	8.29
0.28	380.0	98.93	3.73	8.15
0.28	440.0	115.98	3.69	8.05

为研究不同围压条件下岩石渗透性的变化规律，在保持渗透压差为 5 MPa 不变的条件下，对试样 20—3 以图 5 的加载路径进行了渗透性测试，试验在每一围压条件保持 18 min。根据测试结果，选取每一围压条件 18 min 时间段内压差基本保持不变，同时，体积变化与时间基本呈直线段数据进行

了统计计算, 得到表 2 所示相应测试时间段的各项指标。从表中数据可以看出, 试样的渗透性随围压升高而降低, 随围压降低而升高, 这与相关理论试验研究结果相一致^[7-8], 进一步说明了体变量法渗透性测试的有效性。

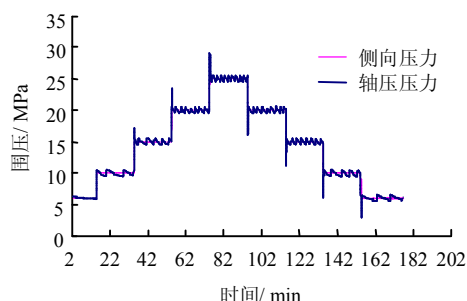


图 5 围压、轴向应力与时间关系曲线
Fig.5 Relationship of confining stress, axial stress with time

表 2 不同围压条件测试数据统计表

Table 2 Statistics of different confining pressure conditions permeability test results

围压条件 / MPa	渗透压 / MPa	体变量 / mL	测试时间 / min	渗透系数 / (10^{-9} cm/s)	渗透速度 / (10^{-4} cm/s)
6.0	4.99	1.3	9.6	4.45	0.29
10.0	4.99	1.8	15.1	3.92	0.25
15.0	5.00	1.3	11.1	3.68	0.24
20.0	4.99	1.5	17.1	2.88	0.19
25.0	5.00	0.5	10.9	1.51	0.10
20.0	4.98	0.8	15.6	1.68	0.11
15.0	4.99	0.7	12.1	1.90	0.12
10.0	4.98	0.9	12.9	2.29	0.15
6.0	4.99	1.0	10.2	3.23	0.21

4 结 论

(1) 提出采用精确测量渗出水体积变化的方法精确计量渗流量的大小, 大大缩短了渗透测试的时间, 提高了测试精度。该法是在渗透出水口端采用特制的圆柱体钢桶, 以精确测量渗出水浮动变化进行与时间的关系曲线判断是否达到稳定渗透速度。

(2) 本次采用磁致伸缩性位移传感器进行位移测量, 只提出了一种精确位移测试方法, 只要满足渗出水浮动位移测试精度要求, 其他任何相关位移测量装置均可用于本试验系统。本方法对强、弱渗透性岩石测试效果均较好, 可无限长时间对渗出流量进行有效测定, 便于推广使用。

(3) 体变量法渗透性测试技术为岩石(体)渗透特性、相关水力学特性试验研究提供了前提条件, 解决了对微小渗流量的准确计量的难题, 为渗透性测试研究提出了一种新的方法体系。

参 考 文 献

- [1] 张铭. 低渗透岩石试验理论及装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 919—925.
ZHANG Ming. Theory and apparatus for testing low-permeability of rocks in laboratory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003 22(6): 919—925.
- [2] 郭大立, 曾晓慧, 江茂泽. 致密岩石渗透特性参数的测量解释方法[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 114—117.
GUO Da-li, ZENG Xiao-hui, JIANG Mao-ze. On measuring and interpretative method of permeability and porosity of tight rocks[J]. **Engineering Mechanics**, 2002, 19(5): 114—117.
- [3] ZHANG M, TAKAHASHI M, MORIN R H, et al. Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining hydraulic properties of low permeability rocks —— part 2: Experimental applications[J]. **Geotech. Testing J.**, 2000, 23(1): 91—106.
- [4] KRANZ R L, SALTZMAN J S, BLACIC J D. Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using oscillating pore pressure method[J]. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. and Geomech. Abstr.**, 1990, 27(5): 345—356.
- [5] 中华人民共和国能源部. MT224—1990 煤和岩石渗透系数测定方法[S]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 1990.
- [6] 韩小妹. 低渗透岩石非 Darcy 渗流试验研究[硕士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [7] 徐德敏, 黄润秋, 张强, 等. 高围压条件下孔隙介质渗透特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 752—756.
XU De-min, HUANG Run-qiu, ZHANG Qiang. Porous media permeability experimental study under high confining pressure[J]. **Journal of Engineering Geology.**, 2007, 15(6): 752—756.
- [8] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415—419.
HE Yu-long, YANG Li-zhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 415—419.