

单裂隙粗砂岩渗流规律试验研究

左伟¹ 韩非¹ 李俊妞²

(1. 中航勘察设计研究院有限公司,北京 100086;2. 中科院建筑设计研究院有限公司,北京 100190)

【摘要】以石嘴山矿西翼采区为研究背景,通过三轴应力作用下岩石单裂隙渗流试验、裂隙开度与有效压力关系试验和大尺度岩石表面粗糙度量测试,结合渗流力学基本理论,揭示了三维应力下单裂隙粗砂岩渗流规律,建立了有效压力、裂隙开度与渗透系数的关系式,以期丰富裂隙岩体渗流的理论研究。

【关键词】单裂隙;裂隙开度;渗透系数;表面粗糙度

【中图分类号】 TU 441.33

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2012.03.002

The Experimental Research on the seepage Law of Single Fracture Gritstone

Zuo Wei¹ Han Fei¹ Li Junniu²

(1. Aviation Industry Survey & Design Institute Co. Ltd. Of China, Beijing 100086, China;

2. Institute of architecture design and research, Chinese academy of sciences, Beijing 100190, China)

【Abstract】 Based on geologic background of Shi Zuishan colliery, the single rock fracture seepage tests under the triaxial stress exists, the relations tests between the effective confining pressure and the fracture aperture. This paper revealed the single fracture gritstone seepage law in the three dimensional stress, and established the relationship among effective confining pressure, fracture pressure and coefficient of permeability, in order to enrich the seepage theory research on fractured rock mass.

【Key words】 single fracture; fracture aperture; permeability coefficient; surface roughness

0 引言

裂隙岩体从生成及地质历史发展过程来说,处于一定的应力环境之中,即具有特定的应力场分布;另一方面,储存并运移于其中的地下水的存在,又使得裂隙岩体赋存于一定的渗流场环境当中,这两场之间的耦合作用(相互影响作用)主要表现在两方面:

1)当裂隙岩体中有渗流发生(存在渗流场)时,地下水渗流在裂隙岩体中引起的渗流作用力(包括静水压力和动水压力)将改变岩体中原始存在的应力状态(裂隙岩体赋存的应力场环境);

2)裂隙岩体中应力状态的改变,又将影响岩体结构,进而改变裂隙岩体的渗透性能,表现为裂隙岩体中地下水渗流场的改变。

以上两方面的相互影响作用是通过裂隙岩体的渗透性能及其改变而联系起来的,当有渗流发生时,这两种作用将通过反复耦合而达到一种动态稳定状态,岩体周围的应力场和渗流场存在着耦合效应。

因此揭示裂隙岩体渗流与应力耦合的作用是十分重要和迫切的,而单裂隙面渗流与应力耦合特性的研究是这一重要课题最基础的研究环节。对此前人做了大量工作, Louis^[1]、Jones^[2]、Nelson^[3]、Kranz^[4]、Gale^[5]等通过试验研究直接得到了渗透性和应力的关系式, Barton^[6]、刘继山^[7-8]等利用单裂隙面的变形规律间接地得出渗流与应力的关系式, Gong^[9]、Walsh^[10]、Tsan 和 Wither-spoon^[11]试图提出某种理论概念模型来解释渗流与应力的耦合规律。

本文在前人工作的基础上,以石嘴山矿西翼采区为研究背景,结合多种试验成果,提出粗砂岩渗透性与应力及裂隙宽度之间的关系,旨在丰富裂隙岩体的渗流理论研究。

1 三轴应力作用下岩石单裂隙渗流试验

在单裂隙面渗流与应力的耦合特性方面,学者们沿着不同的思路进行研究,可以概括为以下三种方法。

1)直接通过试验探求渗透性与应力的经验公式;

2)利用单裂隙面的水流规律和单裂隙面的变形规律,间接地推导出渗透性与应力及裂隙开度的关系;

3)试图提出某种理论概念模型来解释渗流与应力的耦合规律。

本试验采用的是第二种研究思路。本次单裂隙渗流试验依托北京科技大学“金属矿山高效开采及安全教育部重点试验室”及中国矿业大学“煤炭资源与安全开采国家重点实验室”完成。

1.1 岩样采取及制备

试验岩芯取自石嘴山矿西翼采区3#煤层顶板K7砂岩含水层,单裂隙渗透试验岩样: $\phi=50\text{ mm}$, $H=100\text{ mm}$,粗砂岩,共四块,利用岩石切割机把粗砂岩加工成 $50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱体试样。在试样对称的两个侧面位置各布置一根钢丝,并用502强力瞬间粘合剂固定。然后把表面贴有钢丝的试样放置在试验机上,施加荷载。因为钢丝的局部效应对试样产生劈裂效果,裂隙将基本沿着试样的中心面产生和发展。试样见图1。

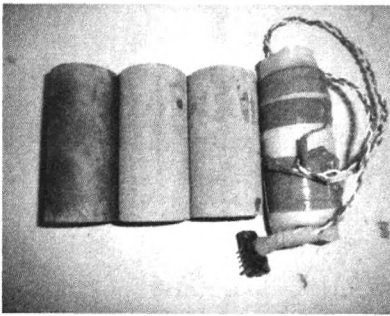


图1 单裂隙渗流试验粗砂岩岩样

1.2 试验内容和步骤

本试验首先通过微机控制电液伺服岩石三轴试验机(见图2),给含有单一裂隙的粗砂岩试样施加围压和水压,并检测在不同围压、水压情况下,渗流量随时间的变化规律(见表1)。本次试验采用的伺服岩石三轴试验机微机输出的有价值的参数包括竖向轴压(MPa),水流量(ml),水压(MPa),时间(s)。其中需要指明的是,在整个试验过程中,竖向轴压为恒定值,轴压在试验过程中只起到固定岩样的作用。

表1 单裂隙渗流试验方案

岩性	编号	直径/mm	高度/mm	围压/MPa	渗透压差/MPa	渗流速度/(ml·s ⁻¹)
粗砂岩	1	50.0	100.0	1.0~4.0	0~2.2	0.0001~0.2583
	2	49.9	100.0	0.1~4.0	0~2.0	0.0001~0.6005
	3	49.9	100.4	0~4.0	0~2.2	0.0001~0.2746
	4	50.1	100.0	0~2.0	0~1.8	0.0500~0.4423



图2 微机控制电液伺服岩石三轴试验机

由于渗流速度与作用在试件上的总应力相关,试验中作用于试件上的应力等于围压与水压之差,这个合力在本章中称为“有效压力”。

1.3 试验结果分析

由图3可以得出如下结论:总体趋势上来看,渗流速度随着有效压力的增大而减小,但减小的幅度并不均匀;在开始加载有效压力时,渗流速度随有效压力增大迅速衰减;随着有效压力继续增大,达到大约1.6 MPa时,渗流速度衰减速度突然趋缓,继续增大有效压力,渗流速度逐渐趋于0。

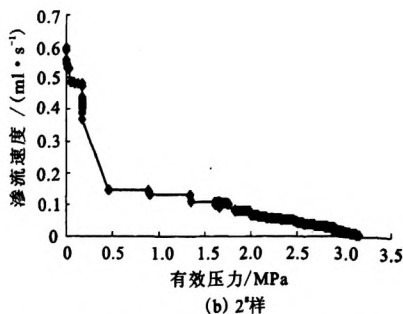
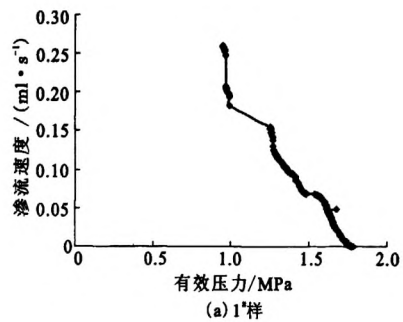


图3 有效压力与渗流速度关系曲线(一)

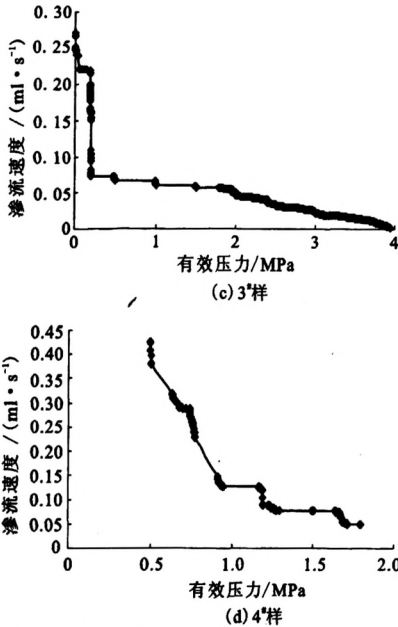


图3 有效压力与渗流速度关系曲线(二)

2 裂隙开度与有效压力关系试验

应用三轴压力机分别对单裂隙岩样进行三轴试验,试验中采用围压值为渗流试验中围压与水压之差,即“有效压力”,将岩样两裂隙表面闭合到一起,沿闭合岩样的一侧裂隙中点位置贴 50 mm×10 mm 应变片,接压力传感器,试验设备见图 1、图 4。

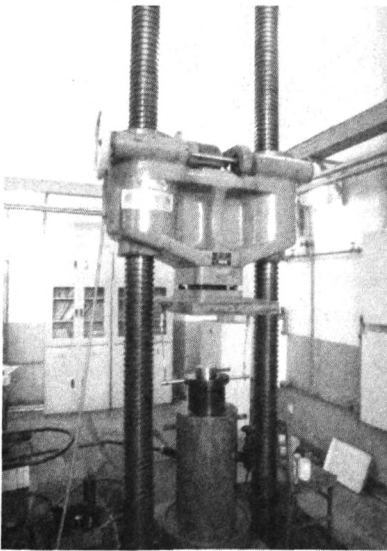


图4 三轴压力试验机

岩样选取同三维应力作用下岩石单裂隙试验。

1# 样有效压力与裂隙开度关系:

$$\sigma = -0.0005 \ln(b) + 0.0607$$

$$R^2 = 0.9497$$

2# 样有效压力与裂隙开度关系:

$$\sigma = -0.0004 \ln(b) + 0.0597$$

$$R^2 = 0.9622$$

3# 样有效压力与裂隙开度关系:

$$\sigma = -0.0004 \ln(b) + 0.0648$$

$$R^2 = 0.9728$$

4# 样有效压力与裂隙开度关系:

$$\sigma = -0.0003 \ln(b) + 0.0689$$

$$R^2 = 0.9787 \quad (1)$$

式中: b ——外表面指定点裂隙开度, cm, 初始值应用游标卡尺精确量测, 试验中由应变片测量其规律;

σ ——有效压力, 即围压与水压之差, MPa;

R^2 ——拟合优度。

试验结果见图 5: 裂隙开度随有效压力增大而减小。由拟合公式(1)可知, 两者成对数关系。

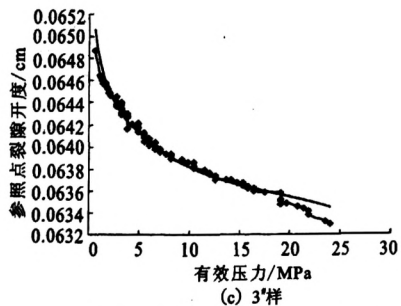
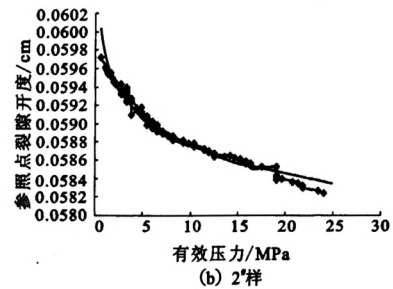
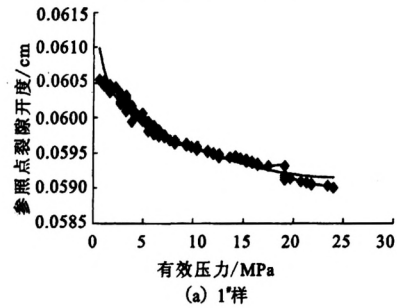


图5 有效压力与裂隙开度关系图(一)

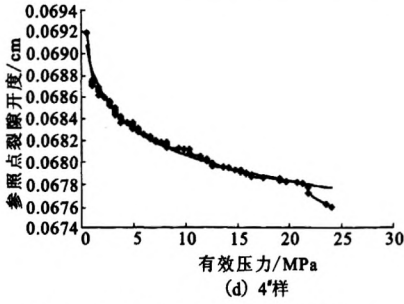


图5 有效压力与裂隙开度关系图(二)

3 大尺度岩石表面粗糙度量测试

目前测量表面形态常见的仪器和主要方法从工作原理上可以分为以下四种。

3.1 测量仪器分类

- 1)以光学原理为基础(包括光切显微镜和干涉显微镜)
- 2)以传感技术为基础:触针式电动轮廓仪
- 3)以激光原理为基础:粗糙度测量仪
- 4)纳米级和超纳米级的扫描隧道显微镜 STM 和原子力显微镜 AFM

3.2 所用仪器及参数设置

经过比较和分析,本次试验采用无接触式三维激光表面形貌扫描仪,它可以保证试样粗糙表面在不受损伤的前提下,对其表面形态进行高精度测量,见图6。该激光仪器是由精密设定的 X-Y 平面移动平台和激光位移计组成。将试样固定在平台上,由计算机操作,自动控制平台沿 X 轴方向移动,不连续面的表面凹凸形状通过激光变位计转换成光信号,再经模拟转换器转换成电信号,由应变仪以数值形式存入计算机中。仪器精度为 0.1 mm,仪器量程为 300 mm,测试的最小间距为 7.5 μm。

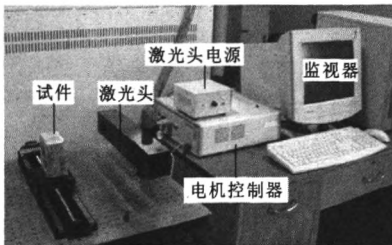


图6 大尺度激光扫描仪

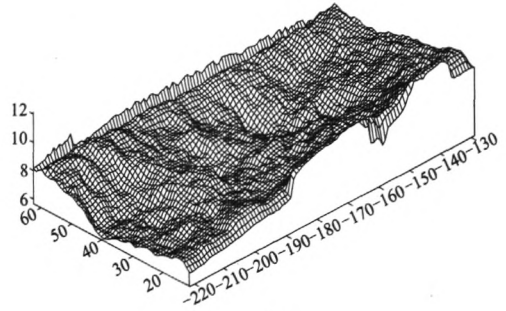
扫描所得的数据由于外界因素的干扰,如光线、周围的噪声导致平台的振动以及平台的平整度不够等等,都可能造成采集数据点产生误差。至于平台的平整度有误差,那是系统误差,只能在实验前做出调整,而对于光线存在造成的偶然误差,制作了一个

黑箱子,保证实验在黑暗的环境下进行。

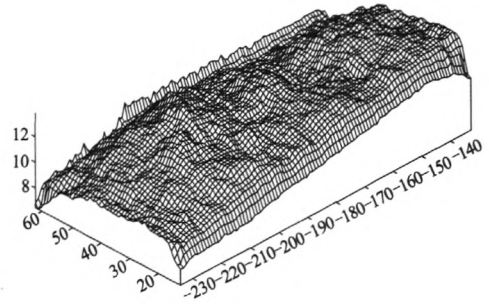
试验选取岩样同三维应力作用下岩石单裂隙渗流试验。

3.3 试验结果分析

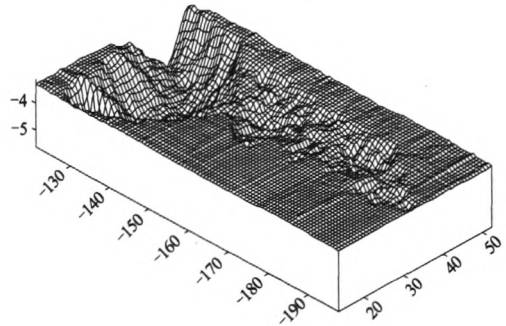
测量结果见图7。



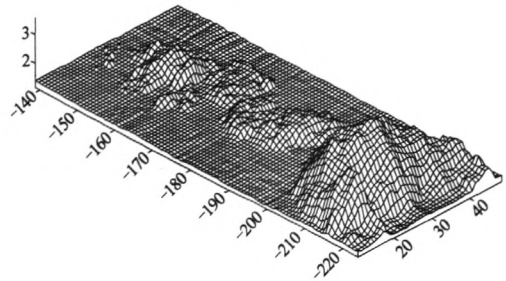
(a) 1#样上表面



(b) 1#样下表面



(c) 2#样上表面



(d) 2#样下表面

图7 大尺度单裂隙岩样表面粗糙度(一)

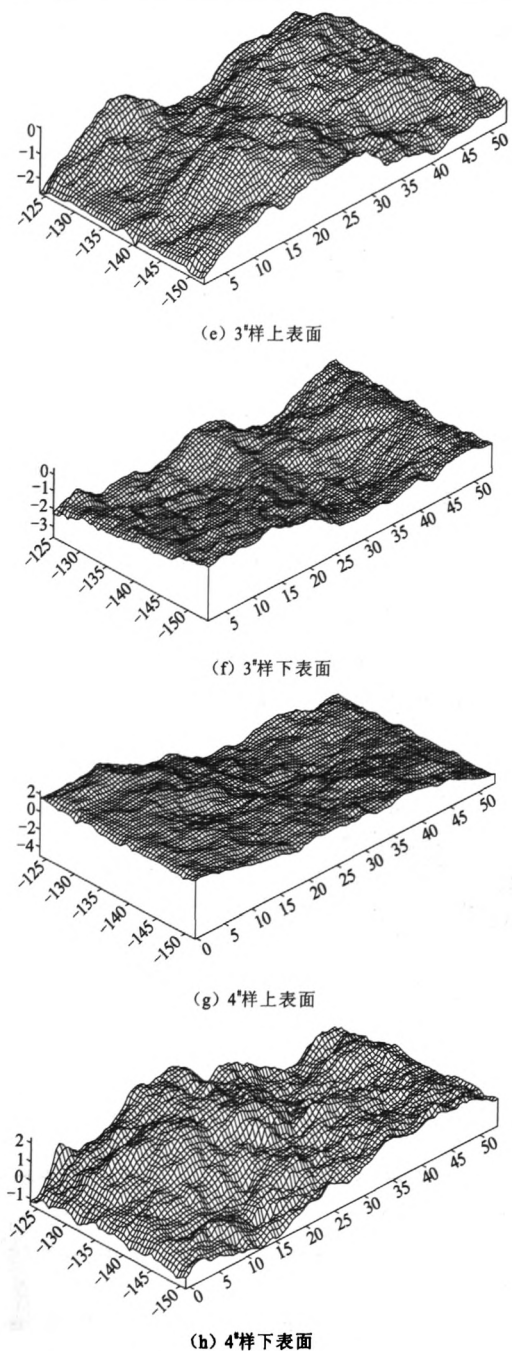


图7 大尺度单裂隙岩样表面粗糙度(二)

大尺度岩石表面粗糙度量测试的主要目的是推导出单裂隙岩样无围压状态下的平均隙宽(见图8)。首先,在岩样左侧外表面裂隙中点处用游标卡尺精确测量,得到外表面中点间的裂隙开度 b' ,即参照点间裂隙开度,然后根据试验结果,分别使岩样上下断面各点高程 $Z_{上}$ 、 $Z_{下}$ 分别减去岩样外表面中点处高程 $Z'_{上}$ 、 $Z'_{下}$,两者之差相加

并取平均值,即可得到岩样上下表面与外表面中点处裂隙开度差的平均值 Δ ,命名为平均凸起高度,计算公式为(2)。

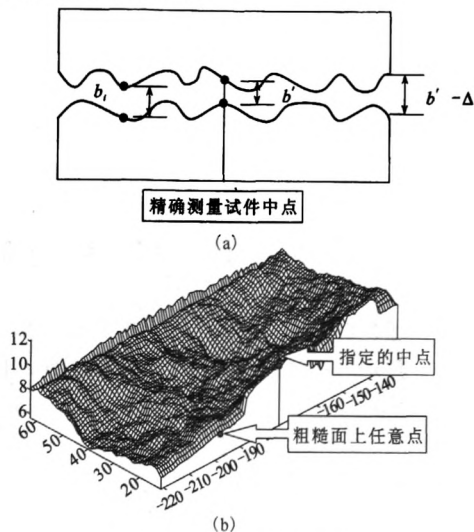


图8 平均凸起高度量测

$$\Delta = \Delta_{上} - \Delta_{下} = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{上i} - Z'_{上i})}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{下i} - Z'_{下i})}{n} \quad (2)$$

则岩样原始平均裂隙开度 $b = b' + \Delta$ 。

通过以上公式,对8个表面, 8×238000 点进行分析,得到结果见表2。

根据达西定律:

$$Q = kAJ = kA \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (3)$$

- 式中: Q ——渗透流量, m^3/d ;
- A ——渗流断面面积, m^2 ;
- H_1 、 H_2 ——岩样上下断面水头高度, m ;
- L ——岩样上下断面垂直距离, m ;
- J ——水力坡度;
- k ——渗透系数, m/d 。

表2 平均裂隙开度计算表

岩样编号	指定点处裂隙开度 b'/cm	平均凸起高度 Δ/cm	平均裂隙开度 b/cm
1	0.0606	0.0032	0.0638
2	0.0597	-0.0040	0.0557
3	0.0649	-0.0067	0.0582
4	0.0692	0.0058	0.0750

达西定律另一个表达形式为:

$$v = \frac{Q}{A} = kJ \quad (4)$$

式中: v ——渗透速度,又称达西速度, $[LT^{-1}]$ 。

通过上式可将试验中所得渗流速度 v 转化成渗透系数 k 。

结合岩石单裂隙渗流试验、裂隙开度与有效压力关系试验和大尺度岩石表面粗糙度试验结果,应用 Matlab 中的 nlinfit 工具箱对渗透系数 k 与裂隙开度 b 及有效压力 $(\sigma-p)$ 进行拟合,得出渗流量与围压、水压和裂隙宽度的经验公式,其主要步骤及结果如下:

1) 依据有效压力等于围压与水压之差的假定,把有效压力裂隙开度关系试验与单裂隙渗流试验结果一一对应。

2) 并把参照点量测裂隙开度 b' 替换为表 2 结果 b 。

3) 经整理,并对数据进行拟合,最终得到如下 4 组经验公式:

1# 样

$$k = 0.2157 \frac{g}{\mu} \frac{b^{2.6458}}{(\sigma-p)^{0.7029}} \quad R^2 = 0.8891 \quad (5)$$

2# 样

$$k = 0.3018 \frac{g}{\mu} \frac{b^{2.0965}}{(\sigma-p)^{1.0939}}$$

3# 样

$$R^2 = 0.5369 \quad (6)$$

$$k = 0.4583 \frac{g}{\mu} \frac{b^{1.2295}}{(\sigma-p)^{0.2696}}$$

$$R^2 = 0.6531 \quad (7)$$

4# 样

$$k = 0.2579 \frac{g}{\mu} \frac{b^{2.9138}}{(\sigma-p)^{0.8975}}$$

$$R^2 = 0.7324 \quad (8)$$

式中: k ——渗透系数, m/h;

μ ——粘滞系数, m^2/s ;

b ——裂隙平均开度, m;

p ——裂隙中水压, MPa;

σ ——围压, MPa。

4) 选取拟合程度最好的 1# 岩样渗透系数经验公式作为最终的结果, 见公式(5)。公式图形描述见图 9, 由图可知: 渗透系数随裂隙开度增加而增大, 随有效压力增加而减小, 裂隙开度的变化对渗透系数的影响要优于有效压力的影响, 这与试验情况完全吻合。

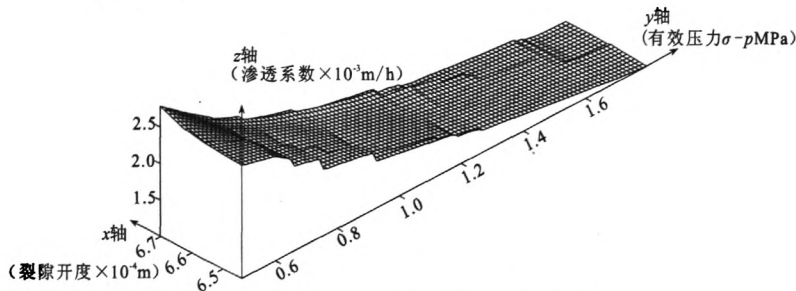


图 9 渗透系数与裂隙开度及有效压力关系

4 试验中的关键问题

1) 试样的围压有伺服三轴试验机的油压提供, 因为岩样有裂隙, 所以围压不可能过高, 否则, 过高的围压会把试样的塑料膜压破造成漏油而导致试验无法完成。

2) 在制取岩样单裂隙时, 应尽量确保裂隙面平行于试样轴面, 此外应尽量确保裂隙面周围无明显裂痕, 否则会影响渗流量的正确读取。

3) 岩样的裂隙开口度应尽量小, 否则通过裂隙的水流是管流而不是渗流。

4) 在整个试验过程中, 应确保给试样施加的水压应始终小于同时施加在试样上的围压, 且二者在数值上差距不能过大。

5) 单裂隙面应尽量能紧密闭合, 且应保证单裂

隙内无碎屑颗粒。否则这些颗粒将会阻碍甚至堵塞裂隙内水体的流动。

6) 有效压力与裂隙开度关系试验中应注意贴应变片后一定要保证密封良好。

7) 大尺度表面粗糙度试验要保证实验过程中无其他光源干扰。

5 结论

1) 通过粗砂岩试样单裂隙渗流试验得到裂隙粗砂岩在围压和水压变化的过程中渗流速度的变化规律。

2) 应用三轴压力试验机对无水压状态下岩样进行三轴试验, 并在裂隙中点处贴应变片, 得到裂隙开度与有效压力之间的关系, 并得到中点处裂隙开度 b' 。

3) 进行大尺度岩石表面粗糙度试验, 得到岩样

平均凸起高度 Δ ,经计算得到裂隙岩样实际开度 b ,结合单裂隙渗流试验、表面粗糙度试验和岩石三轴试验,最终得到石嘴山矿西翼采区 K7 砂岩采取的粗砂岩岩样渗透系数与有效压力和平均裂隙开度关之间关系。

参 考 文 献

- [1] Louis C. Rock Hydraulics[J]. in Rock Mech, Ed by L. Muller, 1974.
- [2] Jones F O. A Laboratory Study of the Effects of Confining Pressure on Fracture Flow and Storage Capacity in Carbonate Rocks [J]. J Petrol Technol, 1975, 27: 21-27.
- [3] Nelson R. Fracture Permeability in Porous reservoirs: Experimental and Field Approach[J]. PH D Dissertation, Department of Geology, Texas A & M University, College Station, TX 77843, 1975.
- [4] Kranz R L, Frankel A D, Engelder T, Scholz C H. The Permeability of Whole and Jointed Barre Granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1979, 16(4): 225-344.
- [5] Gale J E. The Effects of Fracture Type (Induced Versus Natural) on the Stress-fracture Closure-fracture Permeability Relationships[J]. Proc 23th Symp on Rock Mech, Berkeley, California, 1982.
- [6] Barton N, Bandis S, Bakhtar K. Strength Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joints[J]. Int J Rock Min Sci & Geomech Abstr, 1985, 22(3): 121-140.
- [7] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质工程地质, 1987(2): 32-33.
- [8] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, 15(2): 7-12.
- [9] Ganji AF. Variation of Whole and Fractured Porous Rock Permeability with Confining Pressure [J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1978, 15: 249-257.
- [10] Walsh J B. Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1981, 18(3): 429-435.
- [11] Tsang YW, Witherspoon P A. The Dependence of Fracture Mechanical and Fluid Flow Properties on Fracture Roughness and Sample Size[J]. J of Geophys Research, 1983, 88(B3): 2359-2366.

收稿日期: 2012-02-27

(上接第 112 页)

- [15] Lyamin A V, Salgado R, Sloan S W and Prezzi M. Two- and three-dimensional bearing capacity of footings in sand[J]. Geotechnique 2007, 57(8): 647-662.
- [16] 秦会来, 黄茂松. 双层地基极限承载力的极限分析上限法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 611-616.
- [17] 秦会来, 黄茂松, 马少坤. 黏土基坑抗隆起稳定分析的多块体上限解[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 73-81.
- [18] 陈祖煜, 汪小刚, 杨 健, 等. 岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [19] 秦会来. 地基极限承载力及基坑抗隆起稳定分析的多块体上限解[D]. 上海: 同济大学, 2008.

收稿日期: 2012-02-27

作者来函照登

编辑部老师:

您好! 贵刊今年第 2 期刊载的“地基不均匀性定量评价的 excel vba 方法”一文, 尚有 2 处补正:

1. P56 页右栏第 7 行“b1”应为“b”;
2. P58 页续表最后 1 行, 压缩模量当量值栏的数值“4.69”应为“4.39”。

特此说明

谢谢!

作者: 刘大海

2012-05-09