

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2749-06

# 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究

胡大伟<sup>1,2</sup>, 周 辉<sup>1</sup>, 潘鹏志<sup>1</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 邵建富<sup>1,2</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学和工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 法国里尔科技大学 里尔力学实验室, 法国 里尔 59655)

**摘 要:** 渗透率是地下工程的流-固耦合分析中的一个关键因素。对多孔红砂岩进行了三轴压缩试验, 在不同变形阶段实施了轴向应力循环加卸载, 并在试验全过程中测量轴向渗透率, 得到了试样破坏全过程的渗透率演化规律。从平均应力和循环加卸载对渗透率的影响等两方面进行了深入分析, 结果表明, (1) 随着轴向变形的增加, 初始压密阶段和弹性变形试样渗透率均匀减小; 进入塑性变形阶段, 渗透率与轴向变形的曲线逐渐趋于水平, 低围压条件下渗透率略有增加。(2) 轴向加载使骨架颗粒被压缩, 引起孔隙减小, 造成渗透率减小; 采用经验公式定量描述了渗透率和平均应力之间的关系。(3) 轴向应力循环加卸载过程中, 骨架颗粒的不可恢复变形引起渗透率产生不可恢复现象。(4) 峰值后渗透率只发生少许突跳, 说明对于多孔砂岩, 孔隙和裂隙对渗透率的影响相当, 且渗透率的突跳程度随着围压的升高而降低。

**关 键 词:** 渗透率; 砂岩; 孔隙; 应力循环; 平均应力

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

## Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests

HU Da-wei<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui<sup>1</sup>, PAN Peng-zhi<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, SHAO Jian-fu<sup>2</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Laboratory of Mechanics of LILLE, UMR 8107 CNRS, EUDIL-USTL, Polytech-Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq, France)

**Abstract:** Permeability is one of the key factors in hydro-mechanical coupling study for underground engineering. A series of cyclic triaxial compression tests were conducted with red porous sandstones; the axial permeability was calculated according to Darcy's law during the failure process. Based on the mechanical and permeability results, the influences of mean stress and stress cycles on permeability were investigated according to stress-strain curves and deformation modulus evolutions. Some conclusions are drawn: (1) With the increase of axial strain, permeability is consistently decreased in initial compaction and elastic deformation stages; during the plastic deformation stage, the reduction ratio of permeability is gradually decreased; in the end, permeability is even increased under low confining pressure. (2) The skeleton grain compaction causes porosity decrease, consequently permeability decreases; an empirical function is proposed to describe the relationship between permeability and mean stress. (3) During the stress cycles, the irreversible permeability behavior is induced by the irreversible deformation of skeleton grains. (4) There is a weak augment of permeability in post-peak stage, which shows the effect of induced cracks corresponds with the one of pore, the augment extent has a negative correlation with confining pressure, for porous sandstone.

**Key words:** permeability; sandstone; porosity; stress cycle; mean stress

## 1 引 言

地下岩体工程中渗透率是进行流-固耦合分析的一个重要参数。国内外许多学者关于岩石的应力对渗透率的影响方面进行了研究, 并取得了重要的成果。Brace<sup>[1]</sup>首先研究了在高围压和孔压下花岗岩的渗透率变化规律, 开创了结合应力状态研究岩石

渗透率的先例, 得出花岗岩的渗透率随着有效围压的增大而减小, 而孔隙压力对渗透率的影响与围压不同, Patsouls 和 Gripps<sup>[2]</sup>根据英国约克郡的白垩灰岩的渗透率试验也得出类似的结论。通过三轴压缩试验, 人们研究了岩石破坏过程中的渗透率演化规律。Zhang<sup>[3]</sup>对 Carrara 大理石和方解石等岩样的渗透试验表明, 随着应变增大, 渗透率增加得更加

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目 (No. 50579091); 国家自然科学基金项目资助 (No. 10772190); 国家自然科学基金项目资助 (No. 50709036); 国家自然科学基金项目资助 (No. 50979104)。

第一作者简介: 胡大伟, 男, 1981 年生, 博士研究生, 主要从事岩石细观力学、流固耦合试验和理论研究方面的工作。E-mail: hudawei@hotmail.com

明显。Mordecai 和 Morris<sup>[4]</sup>在 Darley Dale 砂岩 的断裂试验中测得渗透率增加 20%。Peach 和 Spiers<sup>[5]</sup>, Stormont 和 Daemen<sup>[6]</sup>对岩盐的试验也得到类似的结论。李世平<sup>[7-8]</sup>开展了岩石应力-应变-渗透率全过程试验研究,发现渗透率是轴向应力、应变的函数。韩宝平等<sup>[9]</sup>的研究结果表明,细砂岩、粉砂岩等低渗透率岩石的渗透率在应力峰值前后附近有一个突跳增大的现象。作彦卿<sup>[10]</sup>采用 CT 扫描技术,从细观角度深入分析渗透率演化的内在机制。张金才等<sup>[11]</sup>通过试验认为,脆性岩石峰值后渗透率明显产生突跳增大,与体应变变化一致。李树刚等<sup>[12]</sup>,姜振泉等<sup>[13]</sup>和朱珍德等<sup>[14]</sup>也得到类似的结论。

综上所述,国内外对岩石全应力-应变过程的渗透率演化规律进行了深入和广泛地探讨,但几乎没有文献涉及轴向循环载荷作用下岩石渗透率演化规律方面的研究,另外,以上研究主要针对于低孔隙岩石 (<5%) 的渗透率和应力关系,对于中高孔隙岩石 (>5%) 的渗透率演化的研究并不多见。为此,本文对多孔红砂岩进行了三轴循环加卸载试验,并在试验全过程中测量渗透率,从平均应力和循环加卸载对渗透率的影响两方面进行了深入地分析。

## 2 试验准备

岩样为取自浙江衢州龙游的红砂岩。试验前,将岩样加工成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的标准试样,放入盛有蒸馏水的密封容器,采用真空泵使其密封容器内,保持 0.1 MPa 的负压 12 h,保证试样充分饱和。然后,采用烘干称重法测量试样的孔隙率,计算得到试样的孔隙率为 21%。

本次试验研究采用中国科学院武汉岩土力学研究所的三轴试验机进行。该试验机可进行温度-应力-渗流耦合的岩石力学试验研究。试验系统由围压、轴压和孔隙水压 3 套独立的加载部分组成,且围压和孔隙水压加载部分具有压力和流量两种控制方式,轴压加载部分具有压力、流量以及轴向、侧向位移控制方式。分别采用 LVDT 和环式位移传感器测量试样的轴向和侧向变形。

## 3 试验结果

### 3.1 静水压力试验

为了更好地了解岩样的孔隙结构,渗透率试验前先测定了其初始有效应力系数。试验前,先饱和试样,进行两种不同类型静水压力试验,一种为在排水情况下加载静水压力,即保持孔隙水压力为 0,另一种为在排水情况下先加载静水压力,同时加载

静水压力和孔隙水压力,保证静水压力和孔隙水压力增量相等。这两种情况下的试验曲线分别如图 1、2 所示。

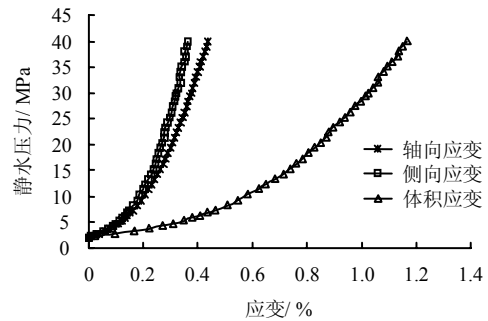


图 1 排水静水压力加载试验  
Fig.1 Drained hydrostatic loading test

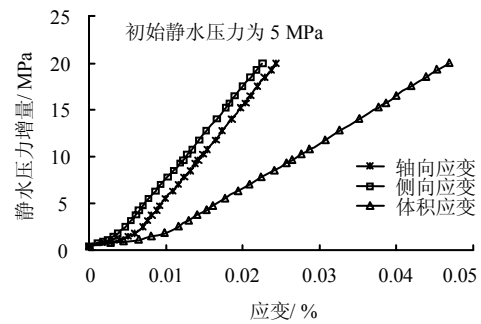


图 2 不排水静水压力加载试验  
Fig.2 Undrained hydrostatic loading test

图 1 中试验曲线可以分成两部分,第一部分为曲线,此阶段试样的变形模量逐渐增大,趋近于一定值,试样中的孔隙和裂纹逐渐压密是引起这种现象的原因。第二部分近似为直线,为弹性变形阶段,通过此阶段的试验曲线,得到材料的排水体积模量  $K_s$ ,并且发现侧向和轴向变形基本相同,这表明材料初始状态是各向同性的。通过图 2 中试验曲线,可以得到材料的骨架体积模量  $K_b$ ,根据 Biot 孔隙弹性本构关系,试样的初始 Biot 系数  $b$  计算公式为

$$b = 1 - \frac{K_s}{K_b} \quad (1)$$

静水压力试验结果为  $K_s = 6\ 905 \text{ MPa}$ ,  $K_b = 50\ 548 \text{ MPa}$ ,  $b = 0.86$ 。

### 3.2 渗透率试验

岩石试样的渗透率有两种测量方法,压力脉冲法<sup>[15]</sup>和稳定渗流法。对于渗透率较小 ( $k < 10^{-16} \text{ m}^2$ ) 的岩石,由于很难获得稳定渗流,一般采用前者;而当渗透率较大 ( $k > 10^{-16} \text{ m}^2$ ) 时,稳定渗流法比较适宜。

3.2.1 试验步骤

初步试验发现，本试验研究的试样渗透率较大，因此采用稳定渗流法。静水压力加载过程结束后，在轴向应力加卸载全过程中，采用计量泵在试样的下端向其内部注水，另一端保持为大气压。其中计量泵保持恒定流量  $Q$ ；试样的下端预设压力传感器，实时记录水头压力  $\Delta p$  变化。根据达西定律，试样的渗透率  $k(m^2)$  计算式为

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta p A} \quad (2)$$

式中： $Q$  为流量 ( $m^3/s$ )； $\mu$  为流体动力黏滞系数，常温下于水其值为  $1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ； $L$  为试样长度 ( $m$ )； $\Delta p$  为水头压力 ( $Pa$ )； $A$  为试样横截面积 ( $m^2$ )。

3.2.2 试验结果

三轴压缩试验围压分别为 0、5、10、20、30 MPa，试验曲线如图 3 所示。比较图 3 各图发现，随着围压的升高，试样的破坏方式由脆性转化延性。当围压低于 20 MPa 时，轴向应力达到峰值后随着轴向变形的增加，轴向应力逐渐减小，应力-应变曲线开始出现应变软化的趋势；当围压大于等于 30 MPa 时，应力-应变曲线为强化的趋势。

此外，在不同的轴向变形阶段进行了轴向应力循环加卸载，由此计算轴向变形模量，并分析其演化规律。在轴向应力加载初期，试样中的孔隙和裂隙首先被逐渐压密，表现出明显的中高孔隙岩石变形特征，此阶段的轴向变形模量逐渐增大，且围压越小，增大的趋势越明显。当孔隙和裂隙基本压密后，骨架颗粒继续被压缩，应力-应变表现为弹性关系，此阶段的轴向变形模量基本不发生变化。随着轴向应力的继续增大，骨架颗粒逐渐破碎，引起孔隙塌陷，试样进入塑性变形阶段；试样中裂纹开始萌生，在低围压的条件下，塑性变形后期阶段形成剪切破坏带；此阶段轴向变形模量逐渐减小。

图 4 给出了不同围压条件体积变形与偏应力的关系曲线。随着偏应力的增大在低围压（此试验中在小于等于 20 MPa）条件下，体积变形由压缩逐渐转化为膨胀，而在围压（大于等于 30 MPa）较大的条件下试样则一直为体积压缩变形。这是因为低围压条件下轴向偏应力使试样中产生大量的裂纹，形成剪切带，即剪胀效应。而在围压较大的条件下，由于侧向围压的约束，试样中出现颗粒破坏和孔隙坍塌现象，即压缩破碎流动<sup>[16]</sup>。

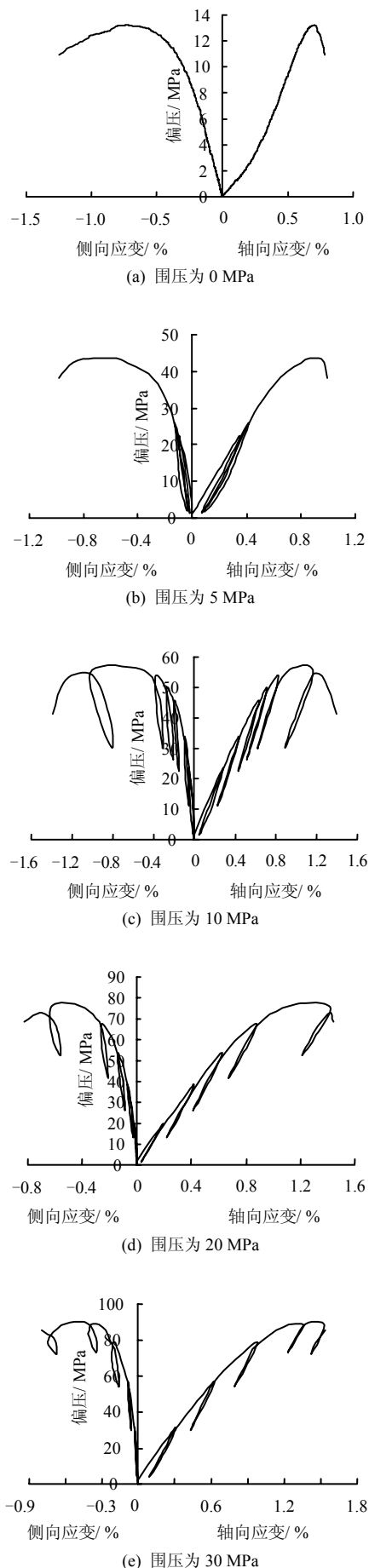


图 3 三轴压缩试验曲线  
Fig.3 Triaxial compression test curves

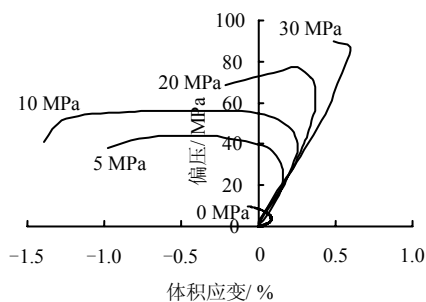


图4 三轴压缩体积变形曲线

Fig.4 Volumetric strain curves under triaxial compression test

根据 3.2.1 节中的试验步骤，分别在围压为 5、10、20、30 MPa 条件下的三轴压缩试验过程中进行了渗透率测试。渗透率随轴向变形的演化曲线如图 5 所示。

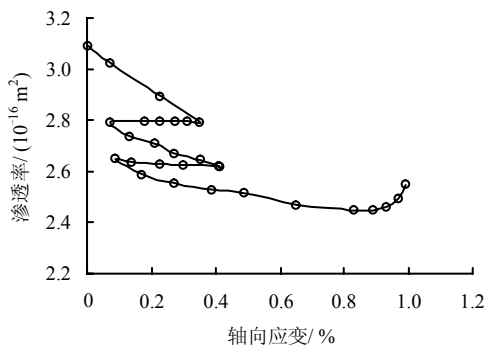
观察图 5 各图可以发现，不同围压条件下试样渗透率均随着轴向变形的增加而减小。在低围压的情况下，随着轴向变形的增加，初始压密阶段和弹性变形阶段试样渗透率均匀减小；进入塑性变形阶段，渗透率与轴向变形的曲线逐渐趋于水平；在峰值强度附近渗透率甚至出现增大的趋势。围压较大的情况下试验过程中渗透率一直随着轴向变形的增加而减小。

### 4 试验分析

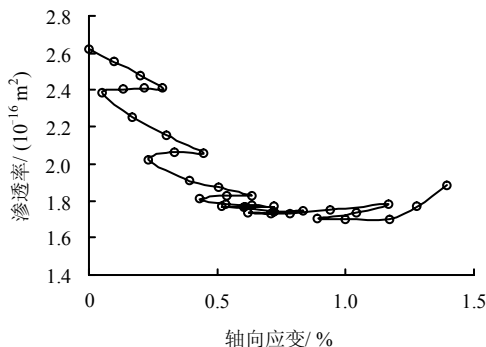
根据以上试验结果，笔者从平均应力 ( $\sigma_1 + 2\sigma_3$ )/3 和轴向应力循环加卸载两方面入手，对渗透率的演化规律进行了深入地分析。

#### 4.1 渗透率和平均应力的关系

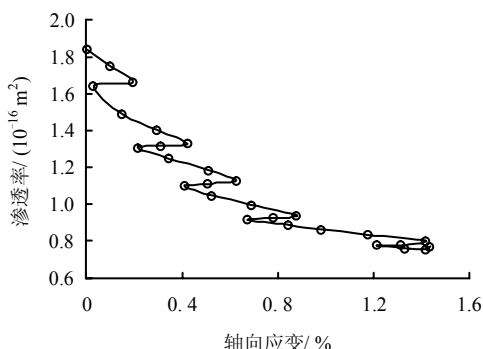
以往的试验及理论研究<sup>[17]</sup>表明，低孔隙岩石在三轴压缩试验（围压不超过 30 MPa）时，脆性破坏过程中微裂纹扩展引起渗透率逐渐增大，并且峰值强度附近的渗透率比初始值高出 2 个量级，甚至更多。本研究中，在脆性破坏的情况下试样渗透率演化规律并不是这样的，笔者认为这主要是由试样中的孔隙在平均应力作用下产生压缩所致。在低围压的条件下，随着轴向应力的增加，初始压密和弹性阶段试样中的骨架颗粒逐渐被压缩，引起孔隙减小，造成渗透率减小；在塑性变形阶段，试样中的骨架颗粒继续被压缩，孔隙继续减小，同时微裂纹逐渐萌生、扩展；在孔隙减小和微裂纹扩展的综合作用下渗透率减小的速率逐渐变小，最后趋近于水平。峰值强度前后宏观裂纹形成，其对渗透率的促进作用已占主导地位，因此渗透率增大。围压较大的条件下试样中的孔隙被压缩，而围压的约束



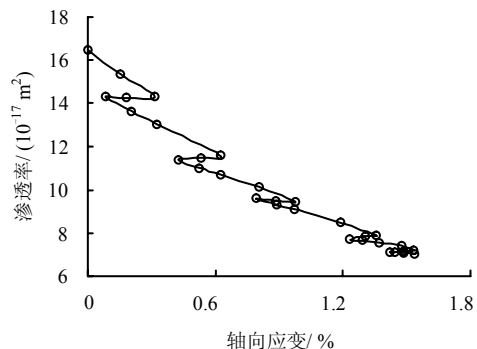
(a) 围压为 5 MPa



(b) 围压为 10 MPa



(c) 围压为 20 MPa



(d) 围压为 30 MPa

图5 渗透率演化曲线

Fig.5 Permeability evolution curves

不利于微裂纹的萌生和扩展，因此渗透率一直减小。最终在试样内部形成压缩带，对流体流动形成阻碍，引起渗透率明显减小。在石油工程中这种现象将会产生消极影响，而在核废料处置工程中，这

会对核废料扩散起到抑制作用。

以上分析说明, 在红砂岩三轴压缩试验中, 孔隙压缩对渗透率影响较大。因此可以借助平均应力, 把渗透率和孔隙变化联系起来, 定量地研究三轴压缩过程中渗透率的演化规律。图6为将轴向应力循环加卸载去掉后的渗透率和平均应力关系曲线。

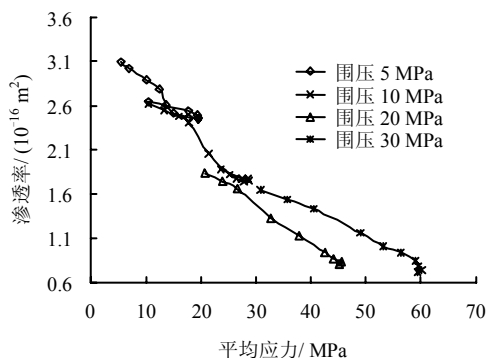


图6 渗透率和平均应力关系曲线

Fig.6 Curves of relationship between permeability and mean stress

由图6可以看出, 渗透率和平均应力之间有很好的规律性, 这与 Wong<sup>[18]</sup>的试验结果相吻合。这里采用指数型的经验公式进行拟合, 公式为

$$k = k_0 \exp(-\gamma \sigma_m) \quad (3)$$

式中:  $k_0$  为初始的渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $\sigma_m$  为平均应力 (MPa);  $\gamma$  为应力敏感性的参数 ( $\text{MPa}^{-1}$ )。拟合结果为  $k_0 = 3.7 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ,  $\gamma = 0.27 \text{ MPa}^{-1}$ 。

#### 4.2 轴向应力循环加卸载对渗透率的影响

由图5各图可以发现, 不同围压条件下在轴向应力卸载过程中试样的渗透率几乎不发生变化; 轴向应力重新加载后, 渗透率继续减小。循环加卸载过程中渗透率出现不可恢复现象。这种现象在初始压密阶段最为明显, 弹性变形阶段次之, 塑性变形阶段不明显。这与 C. A. Morrow 等<sup>[19]</sup>和 Y. Bernabe<sup>[20]</sup>观察到的静水压力循环加卸载引起的渗透率不可恢复现象相似。

图3中, 观察试验的轴向应力循环加卸载过程中可以发现, 初始压密、弹性变形和塑性变形阶段试样均会产生不可恢复的变形。从细观水平进行分析, 在轴向应力加载过程中骨架颗粒发生压缩和旋转, 引起孔隙减小, 甚至崩塌。而在卸载过程中, 由于试样内部的局部残余应力短时间内不能充分释放, 导致部分骨架颗粒不能完全回到初始位置, 将会引起试样产生不可恢复变形, 并引起渗透率产生不可恢复现象。

轴向应力循环加卸载对渗透率的影响表明, 对岩石的渗透率进行研究时有必要考虑其应力历史。

## 5 结论

(1) 随着轴向变形的增加, 初始压密阶段和弹性变形阶段试样渗透率均匀减小。进入塑性变形阶段, 渗透率与轴向变形的曲线逐渐趋于水平, 低围压条件下渗透率略有增加。

(2) 随着轴向应力的增加, 骨架颗粒被压缩, 引起孔隙减小, 造成渗透率减小。回归分析表明可以采用经验公式定量描述渗透率和平均应力之间的关系。

(3) 轴向应力循环加卸载过程中, 骨架颗粒的不可恢复变形引起渗透率产生不可恢复现象。

(4) 峰值后渗透率只发生少许突跳, 说明孔隙和加载破坏过程中产生的裂隙对渗透率的影响相当, 且渗透率的突跳程度随着围压的升高而降低。

## 参考文献

- [1] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, 73(6): 2225—2236.
- [2] PATSOULS G, GRIPPS J C. An investigation of permeability of Yorkshire chalk under differing pore water and confining pressure conditions[J]. *Energy Sources*, 1982, 6(4): 321—334
- [3] ZHANG S, COX S F, PATERSON M S. The influence of room temperature deformation on porosity and permeability in calcite aggregates[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 15761—15775.
- [4] MORDECAI M, MORRIS L H. An investigation into the changes of permeability occurring in a sandstone when failed under triaxial stress conditions[C]//Proceedings of the 12th Symposium of Rock Mechanics, Rolla, Mo.: University of Missouri-Rolla, 1971: 221—239.
- [5] PEACH C J, SPIERS C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. *Tectonophysics*, 1996, 256: 101—128.
- [6] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1992, 29: 323—

- 342.
- [7] LI S P, WU D X. Effect of confining pressure, pore pressure and specimen dimension on permeability of Yinzhuang sandstone[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1997, 34(3/4): 435—441.
- [8] 李世平, 李玉寿, 吴振业. 岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 231—235.
- LI Shi-ping, LI Yu-shou, WU Zhen-ye. The permeability-strain equations relating to complete stress-strain path of the rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(2): 13—19.
- [9] 韩宝平, 冯启言, 于礼山, 等. 全应力应变过程中碳酸盐岩渗透率研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 127—128.
- HAN Bao-ping, FENG Qi-yan, YU Li-shan, et al. Study on the permeability of carbonate during full period of stress-strain[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2000, 8(2): 127—128.
- [10] 仵彦卿, 曹广祝, 丁卫华. CT 尺度砂岩渗流与应力关系试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4203—4209.
- WU Yan-qing, CAO Guang-zhu, DING Wei-hua. Experimental study on relation between seepage and stress of sandstone in CT scale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(23): 4203—4209.
- [11] ZHANG J C, BAI M, ROEGIERS J C, et al. Experimental determination of stress-permeability relationship[M]. Rotterdam: Liebman, Breeds & Doe, Balkema, 2000: 817—822.
- [12] 李树刚, 徐精彩. 软煤样渗透特性的电液伺服试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 68—70.
- LI Shu-gang, XU Jing-cai. Experimental study on permeability of soft coal sample with electro-hydraulic servo-controlled testing system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(1): 68—70.
- [13] 姜振泉, 季梁军. 岩石全应力应变过程渗透率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 153—156.
- JIANG Zhen-quan, JI Liang-jun. The laboratory study on behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(2): 153—156.
- [14] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 555—563.
- ZHU Zhe-de, ZHANG Ai-jun, XU Wei-ya. Experimental research on complete stress-strain process seepage characteristics of brittle rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 555—563.
- [15] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968: 2225—2236.
- [16] WONG T F, DAVIDC, ZHUW. The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B2): 3009—3025.
- [17] 胡大伟, 朱其志, 周辉, 等. 脆性岩石各向异性损伤和渗透率演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1822—1827.
- HU Da-wei, ZHU Qi-zhi, ZHOU Hui, et al. Study in phenomenon and mechanism of non-Darcy seepage in post-peak marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1822—1827.
- [18] ZHU W, WONG T F. The transition from brittle faulting to faulting to cataclastic flow: permeability evolution[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B2): 3027—3041.
- [19] MORROW C A, ZHANG C B, BYERLEE J D. Effective pressure law for permeability of westerly granite under cyclic loading[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (B3): 3870—3876.
- [20] BERNABE YVES. The effective pressure law for permeability during pore pressure and confining pressure cycling of several crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(B1): 649—657.