

DOI: 10.11779/CJGE201510018

# 循环加卸载作用下砂岩孔隙度与渗透率演化规律试验研究

孔茜<sup>1, 3</sup>, 王环玲<sup>\*2</sup>, 徐卫亚<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;  
3. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘 要:** 研究砂岩在多次循环荷载作用下孔隙度及渗透率随荷载的变化规律, 利用致密岩石惰性气体渗透率测试系统对砂岩进行了 5 次循环加卸载试验。试验结果表明: 砂岩的孔隙度和渗透率随围压的增大而减小, 循环加卸载过程中, 砂岩的孔隙度、渗透率在加载阶段与卸载阶段的变化曲线均是不重合的。围压加载阶段孔隙度和渗透率随围压的变化关系均呈指数关系, 在围压卸载阶段孔隙度与渗透率随围压变化均呈幂函数关系。砂岩在低围压条件下渗透率随围压变化的程度较大, 在高围压条件下渗透率变化程度较小。加载阶段砂岩渗透率变化程度在第 1 次循环期间较大, 从第 2 次循环开始由于岩样一定程度的压密渗透率随围压变化越来越小, 而卸载阶段 5 次循环过程中渗透率随围压的减小而增大, 但是循环次数增加过程中, 渗透率的恢复程度相对于第一次循环越来越小。

**关键词:** 循环加卸载; 孔隙度; 渗透率; 围压; 砂岩

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1893-08

**作者简介:** 孔茜 (1990-), 女, 硕士研究生, 从事岩石力学与工程研究。E-mail: kongqian1990@163.com。

## Experimental study on permeability and porosity evolution of sandstone under cyclic loading and unloading

KONG Qian<sup>1, 3</sup>, WANG Huan-ling<sup>2</sup>, XU Wei-ya<sup>3</sup>

(1. Hydraulic and Hydro-Power Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to investigate the evolution of porosity and permeability of sandstone during the cyclic loading and unloading, the cyclic loading and unloading tests on sandstone are carried out by using the test system of gas permeability measurement for compact rock. The test results show that the porosity and permeability of sandstone decrease with the increasing confining pressure. The permeability and porosity curve in the process of loading does not overlap that in the unloading process. In the process of loading, the relationship among porosity, permeability and confining pressure can be well described by an exponential function, and it can be well described by a power function in the process of unloading. The permeability changes faster under low confining pressure than that under high confining pressure. The permeability changes much more largely in the first cyclic loading, and from the second cyclic loading, due to the pre-compaction, the permeability changes with the decreasing confining pressure. But in the process of unloading, the permeability gradually increases with the decreasing confining pressure in the fifth cycles, and compared to that of the first cycle, the recovery of permeability is much smaller with the increase of cycles.

**Key words:** cyclic loading and unloading; porosity; permeability; confining pressure; sandstone

## 0 引 言

砂岩是水利工程、地下石油储备工程以及地下核废料储备工程中常见的岩体。循环加卸载情况在工程中经常遇到, 如, 工程中洞室的开挖与支护、机械振动与波浪荷载等。特别在大坝蓄水、泄水过程, 高边坡开挖加固过程, 煤岩开采、石油天然气储存等工程

中循环加卸载经常发生。由于岩石内部存在大量的微裂纹、微孔洞、微裂隙等, 细观结构十分复杂, 不同

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11172090, 11272113, 11572110);  
江苏省自然科学基金项目 (BK2012809)

收稿日期: 2014-10-28

\*通讯作者

循环加卸载作用下其力学变形性质不同。循环加卸载作用会导致岩石的疲劳、变形等问题，从而导致岩石孔隙度和渗透率的改变。相比较于循环作用下软土的力学特性研究成果<sup>[1-4]</sup>，针对脆性岩石的研究相对较少<sup>[5]</sup>。近年来，随着水利矿山和石油等岩石工程实践的发展，循环荷载作用下的岩石力学特性越来越受到重视和研究。

针对荷载作用下的岩石的孔隙度和渗透率问题的研究。主要是进行了不同围压作用下及流固耦合作用下的孔隙度与渗透率变化规律研究，如：吴凡等<sup>[6]</sup>、刘建军等<sup>[7]</sup>、彭苏萍等<sup>[8]</sup>研究了流固耦合作用下岩体孔隙率、渗透率与有效围压之间的关系，并分别总结出围压与孔隙度和渗透率间的经验公式。Wang 等<sup>[9]</sup>研究了二长花岗岩和花岗片麻岩在不同围压下的孔隙度和渗透率变化关系，提出了有效孔隙度和渗透率之间的函数关系，探讨了围压作用下渗透率演化机理。胡大伟等<sup>[10]</sup>利用三轴压缩试验对砂岩在不同变形阶段实施轴向应力循环加卸载，并测得试样破坏全过程的渗透率，探讨了循环加卸载对渗透率的影响。贺玉龙等<sup>[11]</sup>通过试验对砂岩和单裂隙花岗岩岩样在围压升降过程中岩体渗透率变化特性进行了研究，得出围压升降过程中，砂岩和单裂隙花岗岩的渗透率均随有效应力的增加呈负指数规律减小，而且在围压下降过程中，砂岩和单裂隙花岗岩渗透率的恢复均存在着明显的应力滞后效应。

然而以上的研究，多数是在围压作用或者一次循环升降作用下进行，还不能完全说明循环升降条件下岩体渗透率的变化特性。关于多次围压循环加卸载条件下岩石孔隙度和渗透率变化规律的试验研究还比较少。

本次试验选取湖南某水电站的砂岩，采用致密岩石惰性气体渗透率测试系统，在 3~30 MPa 围压范围内对岩样进行 5 次循环加卸载，测试岩样的孔隙度和渗透率，研究在多次循环加卸载过程中岩石渗透率和孔隙度随围压变化的规律，对围压循环加卸载过程中岩石的孔隙度和渗透率的变化规律进行阐述和分析。

## 1 试验材料和试验设备

### 1.1 试验材料

试验选取湖南某水电站坝基砂岩。试样制作为直径 50 mm，高度 50 mm 的圆柱形试样，如图 1 所示。对岩样进行了电镜扫描 SEM 试验（图 2（a）、（b））。通过岩石微观结构 SEM 分析，砂岩为粒状碎屑结构，细粒结构，岩样颗粒比较均质，没有明显的节理及裂纹等缺陷，多数矿物颗粒不规则的叠加并紧密结合在

一起。但可以看到岩石颗粒边界之间的不整合接触。这些初始的接触特征或许影响其渗透规律。岩石因含有较多氧化物，呈红色。岩样初始物理参数如表 1 所示。

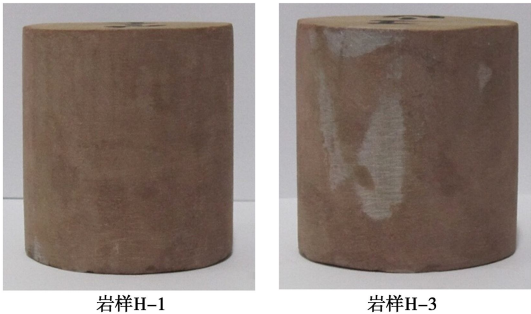
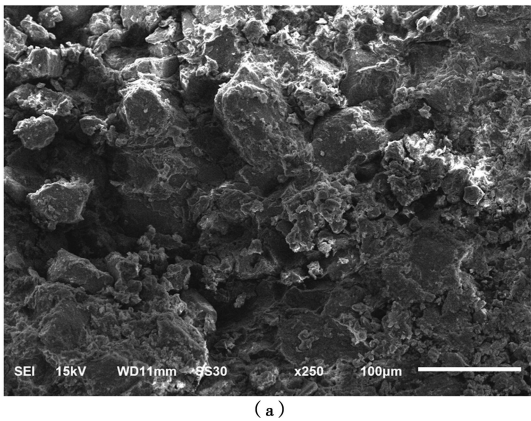
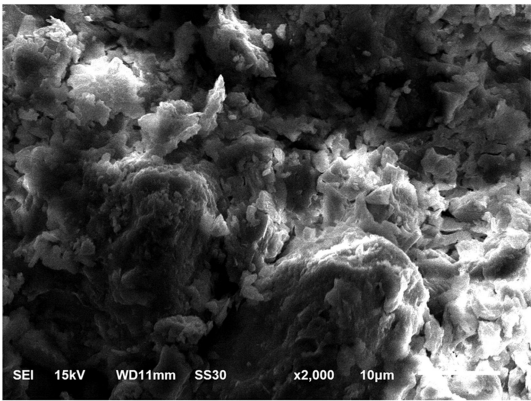


图 1 砂岩试样

Fig. 1 Samples of sandstone



(a)



(b)

图 2 岩石微观结构 SEM

Fig. 2 Microscopic structure of sandstone

表 1 砂岩物理参数

Table 1 Physical parameters of sandstone

岩样编号	孔隙度 /%	高度 /mm	直径 /mm	质量 /g	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
H-1	8.040	49.28	49.12	231.52	2.47
H-3	8.383	49.21	49.12	223.06	2.39

### 1.2 试验设备

试验在致密岩石惰性气体渗透率测试系统上进

行, 该试验设备由河海大学岩石力学实验室和法国国家科研中心里尔力学研究所共同研制。试验装置的主要部件包括气压加载系统, 气体控制面板, 气压传感器, 岩芯压力室, 围压加载系统和高精度气体流量计。测试系统围压加载范围为 0~60 MPa, 渗透率测量有效值可达到  $10^{-24} \text{ m}^2$ 。试验在 25℃ 的恒温条件下进行, 使用氩气作为渗流气体。试验测试系统示意图如图 3 所示。

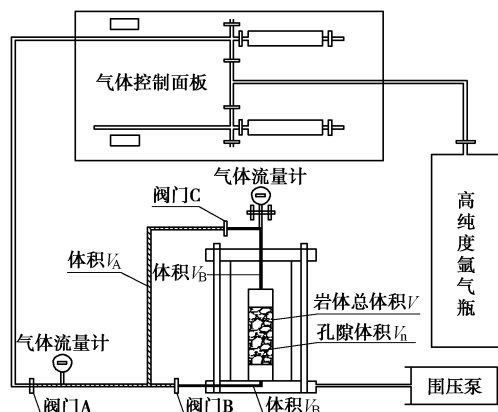


图 3 试验测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test system

## 2 试验原理与过程

岩样的孔隙度测量是基于 Boyle 定理的气体压缩膨胀法进行, 渗透率的测量采用稳态法。在试验过程中保持渗压不变, 通过改变围压的大小进行循环加卸载, 测试不同围压下的孔隙度和渗透率。考虑围压加载和围压卸载两个过程, 试验中设计了 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 MPa 这 7 个围压加载点和围压卸载点, 先由 3 MPa 逐渐增加至 30 MPa, 然后由 30 MPa 下降至 3 MPa, 在每一个围压稳定后依次测量该围压点下的岩样的孔隙度和气体渗透率, 至此完成一次围压加卸载过程。本试验对该围压加卸载过程进行 5 次循环。

测量气体经过岩芯压力室前后的压力变化, 通过式 (1) 计算岩样的孔隙体积  $V_n$ , 由式 (2) 计算岩样的孔隙度  $\varphi$ 。

$$P_A V_A = P_B (V_A + V_B + V_n) \quad (1)$$

$$\varphi = (V_n / V) \times 100\% \quad (2)$$

式中  $\varphi$  为孔隙度;  $P_A$ ,  $P_B$  分别为气压表压力读数,  $V_n$  为岩样孔隙体积;  $V$  为岩样体积, 其中  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $V_A$ ,  $V_B$  均可由试验仪器测得。体积  $V_A$  和体积  $V_B$  如图 2 所示, 其中体积  $V_A$  为出厂设置, 体积  $V_B$  在进行循环加卸载试验之前对仪器进行校正测得。关闭阀门 A、B、C, 待气压稳定后测得  $P_A$ , 然后打开阀门 B、C, 待气压稳定后可测得  $P_B$ 。

根据稳态法测岩样渗透率原理, 将通气管与岩芯

压力室的进气端相连, 岩芯压力室的出气端连接高精度气体流量计, 测量相应时间内通过出气端的气体压力变化。由下式计算岩样的渗透率<sup>[12]</sup>:

$$k = (q \mu L / A \Delta P) \times 100\% \quad (3)$$

式中  $k$  为岩样的渗透率;  $q$  为通过岩样的渗流流量;  $L$  为岩样长度;  $A$  为岩样横截面面积,  $\Delta P$  为岩样两端的渗透压力差。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 围压与孔隙度的关系

图 4 为砂岩 H-1 和 H-3 在初次加载阶段和卸载阶段围压与孔隙度的关系曲线。

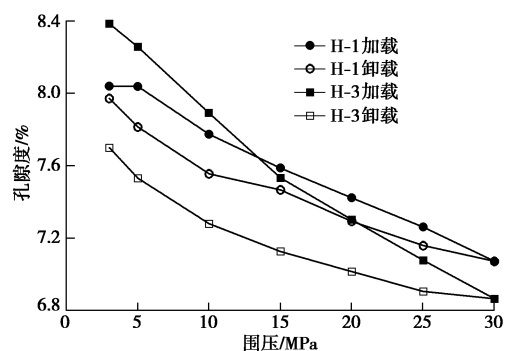


图 4 初次加卸载过程中岩样 H-1, H-3 孔隙度变化曲线

Fig. 4 Curves of confining pressure and porosity of H-1 and H-3 in first loading-unloading process

由试验结果可以看出:

(1) 同样的岩石, 由于天然状态下的孔隙结构差异, 相同围压点测得的孔隙度不同, 并且孔隙度随围压的增减变化程度不同, 但是变化规律基本一致。

(2) 在加载阶段随着围压的增大, 砂岩的孔隙度逐渐减小, 在卸载阶段随着围压的减小, 砂岩的孔隙度逐渐增大。砂岩中的部分孔隙、喉道和微裂隙在荷载的作用下收缩闭合, 其孔隙度随着围压的增大而减小, 而围压卸载过程, 孔隙、喉道和微裂隙会因外力减小而有所恢复, 因此孔隙度有所增加。

(3) 同一围压下, 砂岩卸载阶段的孔隙度小于加载阶段的孔隙度。说明围压加载阶段砂岩产生的变形在卸载阶段不能完全恢复。

由初次循环加载和卸载试验结果可以看出砂岩的有效孔隙度和所承受的围压密切相关。孔隙度与围压之间符合怎样的函数关系, 可以对试验结果进行拟合得到。

通过拟合发现, 加载阶段指数函数拟合程度很高, 相关系数达 0.99。卸载阶段幂函数拟合程度高, 相关系数达 0.97。拟合参数见表 2, 3, 拟合曲线见图 5, 6。

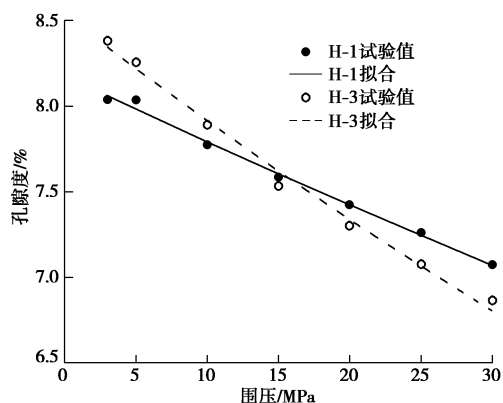


图5 初次加载阶段岩样 H-1, H-3 孔隙度与围压的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves between porosity and pressure for H-1 and

H-3 in first loading process

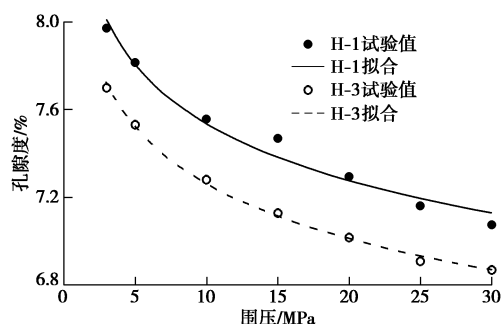


图6 初次卸载阶段岩样 H-1, H-3 孔隙度与围压的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves between porosity and pressure for H-1 and

H-3 in first unloading process

因而, 加载阶段孔隙度随围压变化符合指数变化关系, 指数函数关系表达式如下:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-ap_c} \quad (4)$$

卸载阶段孔隙度随围压的变化符合幂函数关系, 其表达式如下:

$$\varphi = \varphi_0 p_c^{-d} \quad (5)$$

式中,  $\varphi$  为岩石有效孔隙度,  $\varphi_0$  为岩石初始有效孔隙度,  $p_c$  为围压,  $a$  和  $d$  为回归系数, 通过曲线拟合得到。

经过 5 次循环加卸载试验, 得到孔隙度随围压的变化曲线, 见图 7, 8。

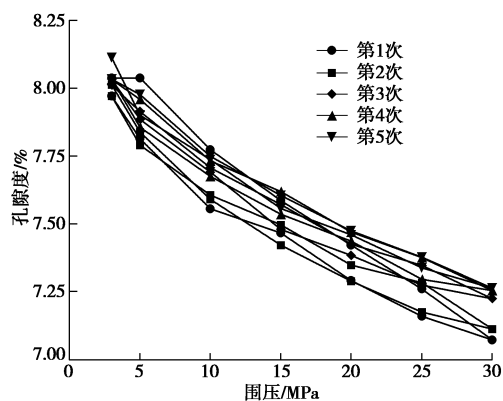


图7 5次循环加卸载过程中 H-1 孔隙度变化规律

Fig. 7 Porosity changes of H-1 under 5 cycles

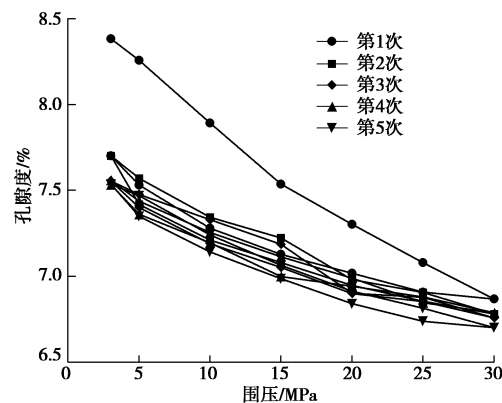


图8 循环加卸载过程中岩样 H-3 孔隙度变化规律

Fig. 8 Porosity changes of H-3 under 5 cycles

根据图 7, 8 可以发现:

(1) 循环加卸载试验中, 加载和卸载过程中, 同一围压点的孔隙度不重合。任意一次加载过程的孔隙度大于该次卸载过程的孔隙度。

(2) 在 3~30 MPa 围压内的任意一次加载过程中, 岩石的孔隙度随着围压的增加而逐渐减小。对 5 次循环加卸载试验的结果进行拟合, 表现为在围压加载阶段岩石孔隙度随着围压的增大呈负指数关系减小, 在围压卸载阶段岩石孔隙度随着围压的减小负幂函数关系增大。加载阶段和卸载阶段的拟合结果分别见表 2, 3。

(3) 随着循环次数的增加, 岩石的孔隙度变化越来越小。循环加卸载条件下, 岩石的变形主要发生在围压第一次加载过程中, 且随着循环次数的增加, 岩石发生的塑性变形所占的比例越来越小, 其结论与文献[12, 13]一致。在循环加卸载试验中岩石主要发生可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形, 随着循环次数的增加, 岩石发生的不可恢复的变形越来越小, 因此其孔隙度的变化程度越来越小。

(4) 比较图 7, 8, 发现围压为 30 MPa 时, 图 7 后续循环加载得到的孔隙度越来越大, 而图 8 在后续循环加载得到的孔隙度越来越小。这两种不同的现象, 说明岩样孔隙度与其内部微结构和微缺陷紧密相关。根据图 2(a) 可知岩样 H-1 中存在黏土性片状构造, 针状、长细粒形状的矿物等, 矿物颗粒间的不整合接触明显。在前两次循环加卸载后, 可能由于循环荷载引起岩石内自身的一些孔洞发生坍塌, 片状矿物和不整合接触的构造在循环荷载中, 发生了变形和挤压, 使得岩样内部本不相通的孔洞、微裂隙, 发展成为相通的孔洞或者新的细碎裂隙。因而导岩样 H-1 (图 7) 出现了从第 2 次循环荷载后, 后续循环加载得到的孔隙度越来越大。通过岩样 H-1 (图 9(a)) 与砂岩 H-3 (图 9(b)) 的 BSE 图片可以发现, H-3 在经过循环荷载后, 岩石内部的孔洞和微裂隙较少, 在循环荷载

作用下岩石内部孔隙主要发生的压密, 因此其后续循环加载得到的孔隙度越来越小。

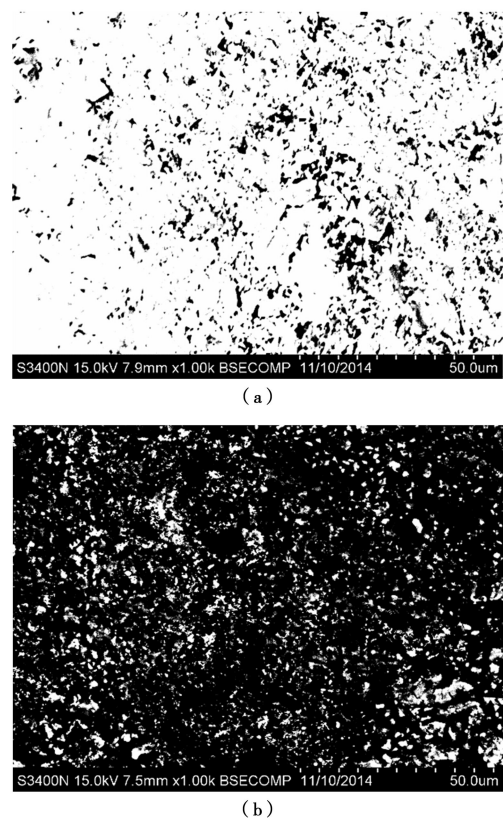


图 9 砂岩 H-1 和 H-3 微观结构 BSE

Fig. 9 Microscopic structure BSE of sandstone

对 5 次循环加卸载过程中砂岩孔隙度随围压变化关系进行拟合, 加载阶段的指数函数拟合参数和相关系数见表 2, 卸载阶段的幂函数关系拟合参数见表 3。

表 2 加载阶段砂岩指数函数关系的拟合参数

Table 2 Fitting parameters in loading process				
循环次数	岩样	$a$	$\Phi_0$	相关系数 $R$
1	H-1	0.005	8.182	0.994
	H-3	0.008	8.537	0.990
2	H-1	0.004	7.974	0.962
	H-3	0.005	7.750	0.976
3	H-1	0.004	8.053	0.978
	H-3	0.004	7.643	0.971
4	H-1	0.004	8.024	0.946
	H-3	0.004	7.592	0.975
5	H-1	0.004	8.094	0.943
	H-3	0.004	7.605	0.981

表 2, 3 中相关系数分别大于 94.3%和 96.6%, 而且拟合得到的初始孔隙度都与试验值比较接近, 相对误差分别为 3.0%和 4.4%。因而, 在围压加载阶段和卸载阶段分别选用指数函数与幂函数关系拟合孔隙度随围压变化的关系是比较合理的。

表 3 卸载阶段砂岩幂函数关系的拟合参数

Table 3 Parameters of sandstone in unloading process

循环次数	岩样	$\Phi_0$	$d$	相关系数 $R$
1	H-1	8.401	0.045	0.966
	H-3	8.161	0.051	0.997
2	H-1	8.514	0.052	0.993
	H-3	7.987	0.047	0.987
3	H-1	8.498	0.047	0.986
	H-3	7.987	0.048	0.989
4	H-1	8.446	0.044	0.985
	H-3	7.917	0.044	0.990
5	H-1	8.547	0.046	0.986
	H-3	7.998	0.052	0.991

3.2 围压与渗透率的关系

初次加载阶段和卸载阶段, 砂岩 H-1、H-3 围压与渗透率的关系曲线见图 10 所示。

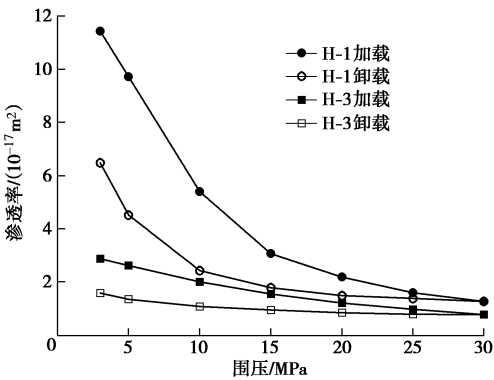


图 10 初次加卸载过程中岩样 H-1、H-3 渗透率变化曲线

Fig. 10 Variation curves of permeability of H-1 and H-3 in first loading-unloading process

由试验结果可以看出:

(1) 两个岩样在同一围压下的渗透率不同, 但没有数量级上的差异。围压为 10 MPa 时, 岩石试样 H-1 的渗透率为  $5.4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 岩石试样 H-3 的渗透率为  $2.0 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

(2) 在围压加载阶段随着围压的增大, 岩样的渗透率逐渐减小; 在围压卸载阶段, 随着围压的减小, 岩样的渗透率重新逐渐增大, 且同一围压下岩样在加载阶段的渗透率大于卸载阶段的渗透率。例如在初次循环加卸载过程中当围压为 15 MPa 时, 岩样 H-1 在加载阶段的渗透率为  $3.1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 在卸载阶段的渗透率为  $1.8 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。岩样 H-3 在加载阶段的渗透率为  $7.6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 在卸载阶段的渗透率为  $7.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。再次说明围压作用使岩样发生了不可恢复的塑性变形, 当围压释放后, 变形不能完全恢复。

(3) 在围压加载初期, 岩石的渗透率减小的较快, 随着围压的增大, 渗透率减小的幅度变缓。由于在围

压加载初期, 岩石内部的微裂隙, 微孔洞等随着围压的加载大量减少, 岩石内部气体可以通过的管道减少, 因此低围压条件下岩石渗透率减小较快, 随着围压等级的增大, 剩余可以压缩的微裂隙, 微孔洞等已经很少, 所能改变的流通能力也就较小, 因此随着围压的增大, 岩石渗透率减小的越来越慢。例如岩样 H-1 在围压由 3 MPa 上升至 15 MPa 的过程, 渗透率由  $11.4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  下降到  $3.1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 渗透率的减小速率由  $0.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{MPa}$  降至  $0.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{MPa}$ 。由 20 MPa 上升至 30 MPa 的过程, 渗透率由  $2.199 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  下降到  $1.3 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 渗透率的减小速率由  $0.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{MPa}$  降至  $0.1 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{MPa}$ 。

根据吴凡等<sup>[6]</sup>、代平等<sup>[14]</sup>、MCKEE 等<sup>[15]</sup>、黄远智等<sup>[16]</sup>研究成果, 由试验数据拟合围压与岩石渗透率之间的关系的主要有以下 3 种:

$$\text{幂关系: } k = k_0 p_c^{-\alpha} \quad (6)$$

$$\text{指数关系: } k = k_0 e^{-\beta p_c} \quad (7)$$

$$\text{多项式关系: } k = \gamma p_c^2 + \theta p_c + k_0 \quad (8)$$

式中  $k$  为岩石气体渗透率的测定值;  $k_0$  为岩石初始气体渗透率;  $p_c$  为围压;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$  为回归系数。

本次试验所得数据, 用这 3 种试验公式进行拟合, 通过比较得出, 在加载阶段, 渗透率随围压变化的关系用指数函数拟合程度高, 相关系数达 0.99。在卸载阶段, 用幂函数关系拟合程度高, 相关系数达 0.99。拟合曲线见图 11 和图 12。拟合参数见表 4, 5。

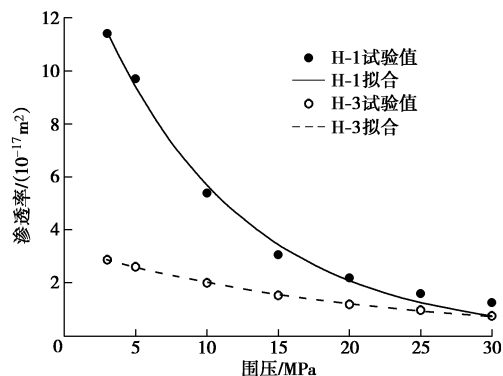


图 11 初次加载阶段岩样 H-1, H-3 渗透率与围压的拟合曲线  
Fig. 11 Fitting curves between permeability and confining pressure for H-1 and H-3 in first loading process

进行 5 次循环加卸载渗透率测试试验, 得到渗透率随围压的变化曲线, 见图 13, 14。

通过图 13, 14, 可以看出:

(1) 加载和卸载过程的渗透率变化在同一围压处是不重合的, 且在任意一个循环加卸载过程中, 同一围压下岩样在加载阶段的渗透率大于卸载阶段的渗透率。例如在第 1 个循环加卸载过程中当围压为 15 MPa 时, 岩样 H-1 在加载阶段的渗透率为  $3.1 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ,

在卸载阶段的渗透率为  $1.8 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 岩样 H-3 在加载阶段的渗透率为  $7.6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 在卸载阶段的渗透率为  $7.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

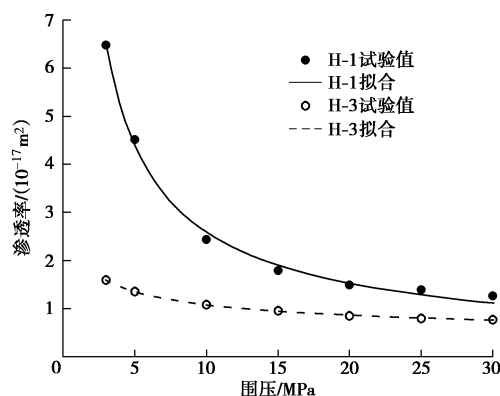


图 12 初次卸载阶段岩样 H-1, H-3 渗透率与围压的拟合曲线  
Fig. 12 Fitting curves between permeability and pressure for rock samples H-1 and H-3 in first unloading process

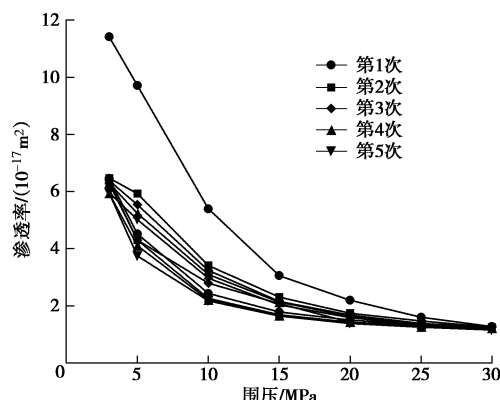


图 13 围压循环加卸载过程岩样 H-1 渗透率变化规律  
Fig. 13 Permeability changes of rock sample H-1 in cyclic loading-unloading process

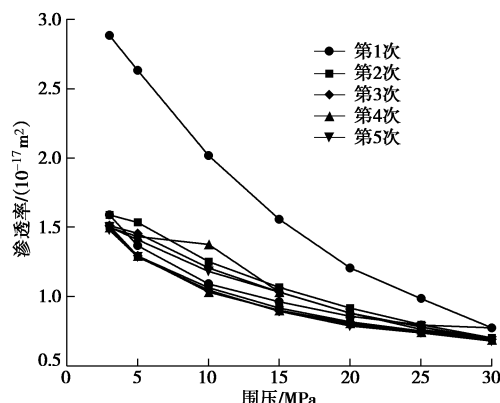


图 14 围压循环加卸载过程岩样 H-3 渗透率变化规律  
Fig. 14 Permeability changes of rock sample H-3 in cyclic loading-unloading process

(2) 任意一次加卸载过程中, 砂岩的渗透率在加载阶段随着围压的增加而逐渐减小, 在卸载阶段随着围压的减小而增大。在低围压下渗透率变化的程度较



大, 在高围压下由于前期一定程度的压密渗透率变化的程度较小。

(3)对 5 次循环加卸载试验的结果进行拟合可以得出(拟合结果见表 4, 5): 围压加载过程中, 渗透率随围压的增加呈负指数关系减小, 围压卸载过程中, 其渗透率随围压的减小呈负幂关系增大, 且在围压下降过程中砂岩渗透率的恢复存在应力滞后效应。

(4) 5 次加卸载循环过程中, 加载阶段第 1 次循环期间砂岩的渗透率随围压变化的程度最大, 从第 2 次循环开始起渗透率随围压变化并不明显, 卸载阶段在 5 次循环加卸载过程中砂岩渗透率随围压变化都不太明显。岩样 H-1 在 1~5 次围压循环加卸载过程中, 相对于上一个循环过程, 同一围压砂岩的渗透率的减小程度依次为 1.4%~76.2%, 18.9%~1.4%, 0.1%~26.8%, 0.7%~9.4%。岩样 H-3 在 1~5 次围压循环加卸载过程中, 相对于上一个循环过程, 同一围压下红砂岩的渗透率的减小程度依次为 2.2%~81.3%, 0.8%~5.2%, 12.4%~1.6%, 1.5%~16.4%。即, 随着循环次数的增加, 围压对砂岩渗透率的影响越来越小。

表 4 加载阶段砂岩的试验参数

Table 4 Fitting parameters in loading process

循环次数	岩样	$\beta$	$k_0$	相关系数 $R$
1	H-1	15.498	0.010	0.991
	H-3	0.050	3.352	0.990
2	H-1	0.077	8.209	0.974
	H-3	0.032	1.757	0.994
3	H-1	0.079	7.969	0.973
	H-3	0.031	1.661	0.995
4	H-1	0.079	7.746	0.974
	H-3	0.040	1.642	0.996
5	H-1	0.077	7.286	0.971
	H-3	0.030	1.631	0.997

表 5 卸载阶段砂岩的试验参数

Table 5 Fitting parameters in unloading process

循环次数	岩样	$\alpha$	$k_0$	相关系数 $R$
1	H-1	0.762	15.012	0.996
	H-3	0.321	2.272	0.998
2	H-1	0.788	15.125	0.994
	H-3	0.322	2.415	0.920
3	H-1	0.722	13.928	0.996
	H-3	0.310	2.260	0.921
4	H-1	0.766	13.788	0.996
	H-3	0.331	2.177	0.997
5	H-1	0.779	13.798	0.993
	H-3	0.331	2.161	0.993

岩样 H-1 和 H-3 在低围压 3 MPa 下的渗透率分别

为  $11.4 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  与  $2.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ , 相关系数分别在 97.1%与 92.0%以上, 而且拟合得到的初始渗透率与试验值十分接近, 相对误差分别为 5.9%和 0.4%。因而, 循环加载阶段和卸载阶段, 渗透率与围压的变化关系符合指数函数关系与幂函数关系。

4 结 论

以湖南某水电站坝基砂岩进行了 5 次循环加卸载孔隙度和渗透率测试试验, 对岩石在 5 次循环加卸载条件下的孔隙度和渗透率变化规律进行了研究, 得到以下 4 点结论。

(1) 在 5 次循环加卸载过程中, 砂岩的孔隙度和渗透率均随围压的增大而减小。

(2) 在 5 次循环加卸载过程中, 砂岩的孔隙度、渗透率在加载过程与卸载过程的变化路径均是不重合的, 且任意一次加载过程的孔隙度和渗透率均大于该次卸载过程的孔隙度和渗透率。

(3) 在 5 次循环加卸载过程中, 围压加载阶段孔隙度和渗透率随围压的变化符合指数函数关系。在围压卸载阶段孔隙度和渗透率随围压的变化符合幂函数关系。

(4) 在 5 次加卸载循环过程中, 加载阶段第 1 次循环的渗透率随围压变化的程度最大, 从第 2 次循环开始由于岩样的一定程度的压密渗透率随围压变化越来越小。而卸载阶段 5 次循环过程中渗透率随围压的减小而增大, 但是循环次数增加过程中, 渗透率的恢复程度相对于第一次循环越来越小。

参考文献:

[1] YILDIRM H, ERSAN H. Settlements under consecutive series of cyclic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27(6): 577 - 55.

[2] 蔡袁强, 王 军. 双向循环荷载作用下饱和软黏土动力特性研究[J]. 湖南大学学报, 2008, 35(11): 62 - 65. (CAI Yuan-qiang, WANG Jun. Study on dynamic behaviors of soft clay under bidirectional cyclic loading[J]. Journal of Hunan University, 2008, 35(11): 62 - 65. (in Chinese))

[3] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75 - 78, 82. (ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 75 - 78, 82. (in Chinese))

[4] 魏新江, 张 涛, 丁 智, 等. 循环荷载下不同固结度饱和软黏土刚度变化试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 675 - 679. (WEI Xin-jiang, ZHANG Tao, DING Zhi,

- et al. Experimental study on stiffness change of saturated soft clay with different degrees of consolidation under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 675 - 679. (in Chinese)
- [5] 赵 闯, 武 科, 李术才, 等. 循环荷载作用下岩石损伤变形与能量特征分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 890 - 896. (ZHAO Chuang, WU Ke, LI Shu-cai, et al. Energy characteristics and damage deformation of rock subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 890 - 896. (in Chinese))
- [6] 吴 凡, 孙黎娟, 何 江. 孔隙度、渗透率与净覆压的规律研究和应用[J]. 西南石油学院学报, 1999, **21**(4): 23 - 25. (WU Fan, SUN Li-juan, HE Jiang. The research and application of permeability, porosity and net overburden pressure laws[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1999, **21**(4): 23 - 25. (in Chinese))
- [7] 刘建军, 刘先贵. 有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、渗透率的影响[J]. 地质力学学报, 2001, **7**(1): 41 - 44. (LIU Jian-jun, LIU Xian-gui. The effect of effective stress on porosity and permeability of the low permeability porous medium[J]. Journal of Geomechanics, 2001, **7**(1): 41 - 44. (in Chinese))
- [8] 彭苏萍, 孟召平, 王 虎, 等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(5): 742 - 746. (PENG Su-ping, MENG Zhao-ping, WANG Hu, et al. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(5): 742 - 746. (in Chinese))
- [9] WANG H L, XU W Y, ZUO J. Compact rock material gas permeability properties[J]. Physica B: Condensed Matter, 2014, **449**: 10 - 18.
- [10] 胡大伟, 周 辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三周循环加卸载条件下的渗透率研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (HU Da-wei, ZHOU Hui, PAN Peng-zhi, et al. Study of permeability of sandstone in triaxial cyclic stress tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2749 - 2754. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 许 江, 鲜学福, 王 鸿, 等. 循环加、卸载条件下岩石类材料变形特性的试验研究[J]. 岩石力学工程学报, 2006, **25**(1): 3040 - 3045. (XU Jiang, XIAN Xue-fu, WANG Hong, et al. Experimental study on rock deformation characteristics under cycling loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(1): 3040 - 3045. (in Chinese))
- [13] 陈运平, 王思敬. 多级循环荷载下饱和岩石的弹塑性影响[J]. 岩土力学, 2010, **31**(4): 1030 - 1034. (CHEN Yun-ping, WANG Si-jing. Elastoplastic response of saturated rocks subjected to multilevel cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(4): 1030 - 1034. (in Chinese))
- [14] 代 平, 孙良田, 李 闽. 低渗透砂岩储层孔隙度、渗透率与有效应力关系研究[J]. 天然气工业, 2006, **26**(5): 93 - 96. (DAI Ping, SUN Liang-tian, LI Min, et al. Study on relation between porosity/permeability and effective stress of sand reservoir with low permeability[J]. Natural Gas Industry, 2006, **26**(5): 93 - 96. (in Chinese))
- [15] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal and other geologic formations[J]. SPE Formation Evaluation, 1988, **3**(1): 81 - 91.
- [16] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J]. 岩石力学工程学报, 2007, **26**(2): 410 - 414. (HUANG Yuan-zhi, WANG En-zhi. Experimental study on coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective pressure for low permeability rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(2): 410 - 414. (in Chinese))