

高围压条件下含充填裂隙类岩石水 渗流试验研究

刘欣宇^{1, 2}, 刘爱华¹, 李夕兵¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 内蒙古科技大学 建筑与土木工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 进行高围压、高水压条件下的含充填裂隙类岩石的渗透性试验研究, 根据配比试验, 制作模拟砂岩的试样, 并应用自主研发的三轴试验仪器进行试验研究。研究发现: (1) 不同充填裂隙试样的渗透系数不同, 但不同围压下渗透系数均处于同一数量级; (2) 围压升高时, 充填裂隙介质的渗透系数呈下降趋势; (3) 渗透结构面几何特征是影响试样渗透性的主要因素之一; (4) 试样渗透性规律应建立在试验的基础上。

关键词: 岩石力学; 充填节理; 相似材料; 渗透性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)07 - 1390 - 09

EXPERIMENTAL STUDY OF PERMEABILITY OF ROCK-LIKE MATERIAL WITH FILLING FRACTURES UNDER HIGH CONFINING PRESSURE

LIU Xinyu^{1, 2}, LIU Aihua¹, LI Xibing¹

(1. *School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China*; 2. *School of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China*)

Abstract: The tests for permeability of rock-like sample with filling fractures under high confining pressure and hydraulic pressure are carried out. Based on the ratio test, the specimens simulating sandstone are made; and the tests are made by self-developed triaxial instrumentation. From the results, it is found that: (1) The permeability coefficients of different filling fractures specimens are different; but they are always in the same magnitude under different confining pressures. (2) The permeability coefficient shows downward trend with the increase of confining pressure. (3) The geometrical characteristic of permeability structural surface is one of main factors influencing permeability of sample; (4) Permeability law of sample should be based on the test results.

Key words: rock mechanics; filling joint; similar material; permeability

1 引言

大量实际工程经验证明, 进行渗流分析、并采用合理的渗流控制措施, 可在一定程度上提高工程

设计的安全性和经济性。国内外很多工程失事的实例都是由于岩石(体)渗流而引起的, 如: 我国梅山连拱坝坝体异常位移的出现, 是由于岩石裂隙渗水造成的; 法国 Malpasset 拱坝裂隙岩体的变形则是由于岩体的渗透压力作用引起的, 从而导致大坝

收稿日期: 2012 - 03 - 04; **修回日期:** 2012 - 05 - 13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732000); 国家自然科学基金资助项目(50934006)

作者简介: 刘欣宇(1985 -), 女, 2009年毕业于中南大学城市地下空间专业, 现为博士研究生、助教, 主要从事城市地下空间工程和岩石力学与工程方面的教学与研究。E-mail: ivy-liu@live.cn

溃坏失事。

在岩土工程研究中, 有关于岩石力学及其渗透特性的研究现已成为前沿性的热点。K. Iwai 等^[1-3]建立了非线性函数表达式, 用以描述单裂隙岩体导水系数与平均裂隙开度以及外加渗流体压力梯度的关系。刘继山^[4-5]通过试验研究单裂隙闭合度的变形对导水系数的影响, 获得了闭合度与岩体导水系数的关系。田开铭^[6]利用多裂隙管道试验, 探讨了交叉裂隙的水力特征, 从而推进了裂隙岩体的渗流试验。整个岩体水力学研究的理论基础之一即为裂隙岩体的渗流试验。

相比于一般渗透压与地应力的作用, 强渗透压与高地应力的联合作用表现出其固有的特殊性。不同的岩体变形破坏, 所采用的防治方法也不同。在我国能源开发、利用工程建设中, 该问题是迫切需要解决的重大工程关键技术问题, 必须进行综合、系统、深入的研究, 且具有一定研究前景。

目前, 国内外关于单裂隙及交叉裂隙试验研究成果较丰富, 但含充填物裂隙渗流试验的成果尚不多见, 因此, 本文采用相似材料制作了含充填物的单裂隙、交叉裂隙以及双倍宽裂隙试样, 进行渗流试验研究。与一般渗流问题不同, 本文进行了 15~45 MPa 围压及 12 MPa 稳定水压条件下的渗流联合作用研究。根据渗透试验数据及其破坏现象, 分析 3 种类型试样在不同围压条件下表现出的力学特性及渗透变化规律, 从而总结出一般性的变化规律。

2 试验设计

2.1 试验仪器

配备相应的试验仪器, 进行高水头压力作用下岩体的力学特性、渗透特性和破坏机制研究。高围压下岩石渗透耦合试验中, 由于较难精确实现各向压力的控制、试样的密封性、应力-应变与渗流量的测量等, 因此, 对设备的要求较高。目前, 国内外能开展此类试验的仪器较少。

根据试验原理, 室内试验中渗透性的测试方法可分为两大类: 一类是传统的定水位和变水位法, 即在试样的两端施加一定或变化的水压差, 试样的渗透系数通过测量渗透流量来计算; 另一类是 20 世纪 60 年代, W. F. Brace 等^[7-8]提出的压力脉冲法以及定流量法, 即直接施加压力脉冲或向试样的一端注入一定流量的水, 试样的渗透系数则通过测量

试样两端的压力差随时间的变化来计算。

本试验系统是在实验室原有的 SANS 牌 2 000 kN 伺服试验机基础而改进的装置^[9], 如图 1 所示。原有系统可通过计算机控制进行数据的自动采集和处理, 是较先进的国产试验设备, 可进行完整岩石的剪切、抗拉、压缩 3 种常规试验研究。经过改进, 该系统可实现较高精度的围压、轴压、孔隙水压力 3 套封闭系统的独立控制。



图 1 SANS 伺服试验机

Fig.1 SANS servo test machine

岩石孔隙水压力及三轴围压伺服控制系统由 2 套单独的液压伺服液源、水压执行机构、水压及围压电气测控、水压与围压伺服控制软件及三轴室等单元组成, 如图 2 所示。2 套压力系统均由高精度压力传感器与伺服电机组成闭环控制系统, 同时, 水压和围压与三轴室通过高压胶管相连, 在进水口、进油口及出水口均装置有压力表, 用来校正水压和油压, 确保试验的精确性。本仪器采用的是移动式自平衡三轴室, 质量较轻, 如图 3 所示。可进行三轴和孔隙水压条件下岩石力学各类试验。最大围压达 60 MPa, 最大孔隙水压达 30 MPa, 试样尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。三轴室的活塞行程为 35 mm ($-10 \sim 25 \text{ mm}$), 配置 2 个耐高压玻璃封接插头, 用于将传感器信号从三轴室内引到室外。

2.2 试样设计

H. H. Einstein 等^[10-13]以砂为骨料、石膏为主要胶结材料来模拟岩石, 这种材料的优点是: 材料脆性与岩石脆性表现相近; 可模拟抗压强度为 15~150 MPa, 几何尺寸比例为 20~100 范围内的岩体; 简单的制作工艺, 广泛的材料来源。



图2 水压及围压系统液压控制系统

Fig.2 Water pressure and confining pressure control system

浇筑试样时，在模型内壁均匀涂上一层黄油，以便于日后脱模；同时，根据配比要求，将水泥、石膏和砂子混合，再加水搅拌(加水量约为总质量的12%)；材料拌合均匀后，尽快倒入模型内，安置插片，并在倒入过程中不断用铁棍振捣，试样制作过程如图4所示。



图4 试样制作过程

Fig.4 Sample making process

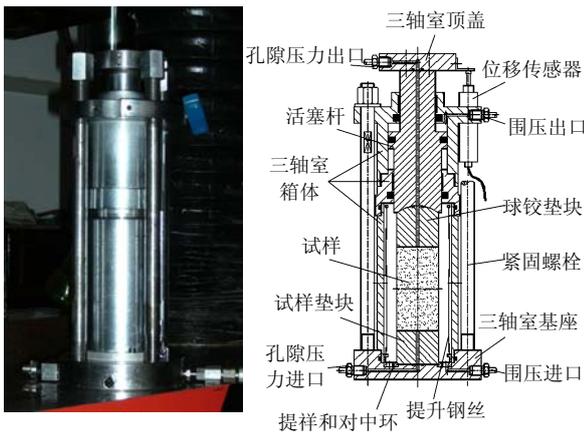


图3 三轴室及工作原理

Fig.3 Triaxial chamber and working principle

通过李晓红等^[14]的研究及各种配比试验，最终采用河砂：HPG-A 水泥：普通建筑石膏= 3：0.7：0.3 以模拟砂岩。其中，河砂粒径级配为：粒径小于 0.25 mm 的颗粒含量占 19.4%，0.25~0.50 mm 的含量占 39.6%，0.5~1.0 mm 的含量占 36.1%，1.00 mm 的含量占 4.9%。该配比材料短期内可达到试验拟实现的抗压强度要求。标准的完整试样(70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm)的抗压强度为 3.5 MPa，弹性模量为 450 MPa，密度为 1.98×10³ kg/m³，泊松比为 0.16。

制作直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体试样。

试样完成后，干燥 20 h，拔出插片，同时灌注石膏砂浆，其中，水与石膏的质量比为 1：1.5。考虑到石膏的不耐水性，同时加入与石膏等量的粒径级配为 0.25~0.50 mm 的河砂，此时预置裂隙的充填物厚度为 2.5~3.0 mm。隔天拆模，在室内常温环境下，自然干燥 30 d。完成的部分试样如图 5 所示。



图5 试样制作完成

Fig.5 Sample completion

3 渗透性试验研究

3.1 试验原理

室内低渗透性测量方法主要有瞬态压力脉冲法或称压力衰减法^[7-8, 15]、恒流泵法^[16-18]和压力振荡法^[19]。这 3 种方法的相同点在于渗透系数的测量均是在非稳定流状态下进行的，因而大大减少了测量时间，降低了随长时间测量而引起的泄漏和温度变

化的影响。此外，考虑到高精度的压力计测量比高精度的流量测量容易实现，因此，本试验中监测的是压力，从而提高了渗透系数的精度。

目前，瞬态压力脉冲法被广泛应用于低渗透岩石的测试，该方法在测定岩石的渗透性时不需要测量流量，而是通过测量试样的上、下游压力随时间的变化，使测试时间大大减少，且避免了用常规方法测量时，计量流体通过致密岩石时流量微小的困难；同时，在高孔隙水压力试验中，测得到岩芯渗透特性更接近于岩体的真实赋存环境。

求解渗透系数的方法有图解法、近似解法和反分析法。H. W. Olsen^[8]提出的近似解法认为，由于水的压缩系数 C_w 远小于矿物基质的压缩系数 C_s 以及试样的有效压缩系数 C_{eff} ，在岩石孔隙度很低时，比贮留系数 S_s 可近似为 0。在上、下游水箱容积和试样的体积远大于孔隙量的条件下，可以得到

$$\frac{\delta P(t)}{P_i} \propto \exp(-at) \quad (1)$$

$$a = \frac{kA}{\mu C_w L} \left(\frac{1}{V_u} + \frac{1}{V_d} \right) \quad (2)$$

式中： A 为试样横截面积； L 为试样长度； $\delta P(t)$ 和 P_i 分别为上、下游水箱差压实测值和初始值； t 为时间； μ 为水的黏滞系数； k 为渗透系数； V_u 和 V_d 分别为上、下游水箱体积。

渗透系数的计算方法为：在半对数坐标上作出差压 - 时间曲线，求出曲线的斜率值 a ，然后将 a 代入式(2)，经变换求得渗透系数，计算公式如下：

$$k = \frac{\mu C_w V L \lg(\Delta p_i / \Delta p_f)}{2A (T_f - T_i)} \quad (3)$$

式中： Δp_i ， Δp_f 分别为试验起始与终止时的孔隙水压差(Pa)； T_i ， T_f 分别为试验起始、终止时间(s)。

3.2 不同围压下渗透性试验研究

岩石孔隙或裂隙结构在围压条件改变时会发生改变，从而影响其渗透性。轴向压力与侧向压力发生改变时，岩石内部结构所受到的影响不同，进而造成其渗透性变化特征也有所不同。研究岩石的变形与渗透性在不同围压条件下的特点，对实际工程设计具有一定的指导意义。因此，本文在围压条件变化情况下，采用含有不同类型未贯通充填裂隙介质的砂岩相似材料制作试样，进行渗透性测试研究。

如图 6 所示，先施加一定的轴压 P_1 、围压 P_2

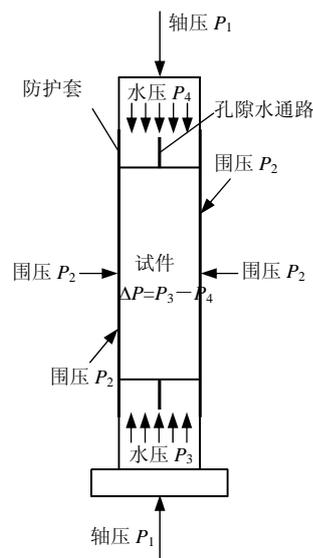


图 6 试验原理图

Fig.6 Test principle

和孔隙水压 P_3 (始终保持 $P_3 < P_2$)，然后降低试样一端的孔隙水压至 P_4 ，在试样两端形成渗透压差 $\Delta P = P_3 - P_4$ ，从而引起水在试样内发生渗流。试样特征如表 1 所示。

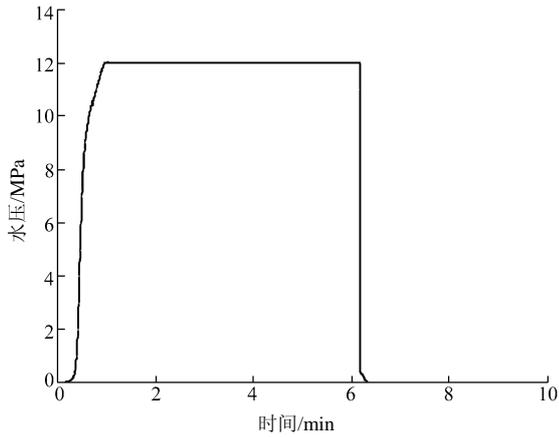
表 1 试样特征

Table 1 Sample characteristics

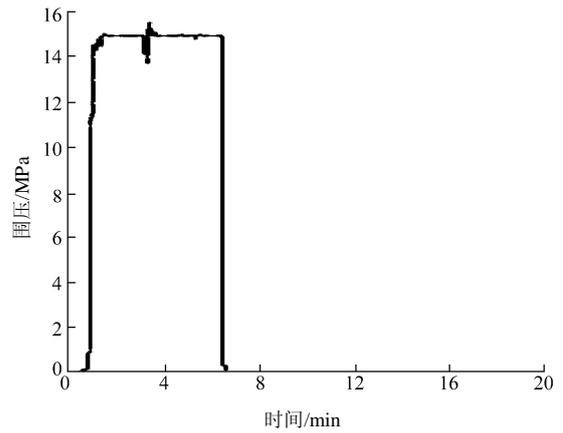
试样类型	直径×高度/ (mm×mm)	预置裂隙描述 (渗透结构面几何特征)
单裂隙(I)	50×100	试样内分布 1 组贯通率为 50% 的平直结构面，其开度为 2.5~3.0 mm；开裂结构面内均匀充填石膏砂浆质成分
交叉裂隙(II)	50×100	试样内分布 2 组贯通率为 50% 且夹角为 90° 的平直结构面，其开度为 2.5~3.0 mm；开裂结构面内均匀充填有石膏砂浆质成分
双倍宽裂隙(III)	50×100	试样内分布 1 组贯通率为 50% 的平直结构面，其开度为 5~6 mm；开裂结构面内均匀充填有石膏砂浆质成分

考虑试验仪器测试的可行性及压力设置的合理性，本次试验按围压 15, 25, 35, 45 MPa 四个级别，其中，进水压力稳定在 12 MPa，出水端压力为 0。

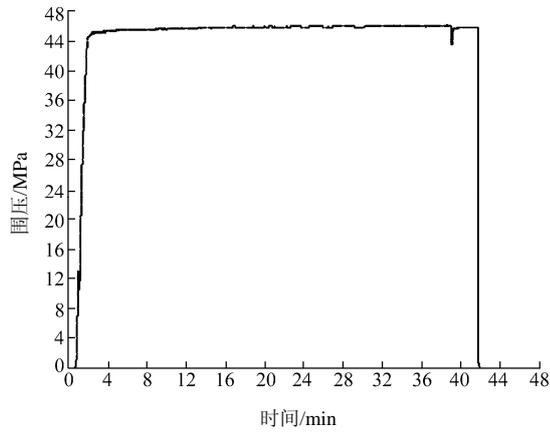
试验中压力监测曲线如图 7 所示。图 7(a)中，当试验开始施加水压时，先关闭进水口使水压增至所需值，此时对应图中曲线的上升段；当其稳定在 12 MPa 时，打开进水口开始渗流测试。由图 7(b)~(e)可看出，试验过程中围压出现波动，这种现象是试样中的微裂隙进一步发展、破坏造成的，同时，这种波动在较低围压下表现更明显，说明高围压下较少发生这种微裂隙破坏。



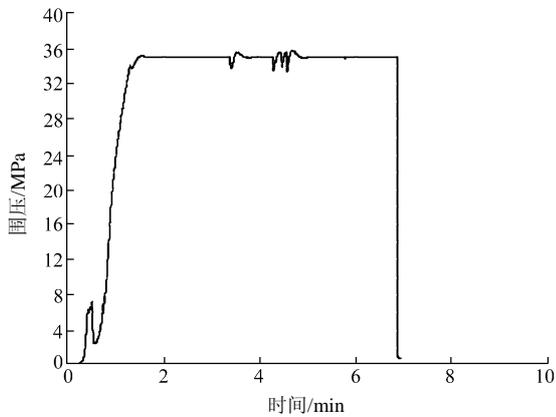
(a) 水压 - 时间曲线



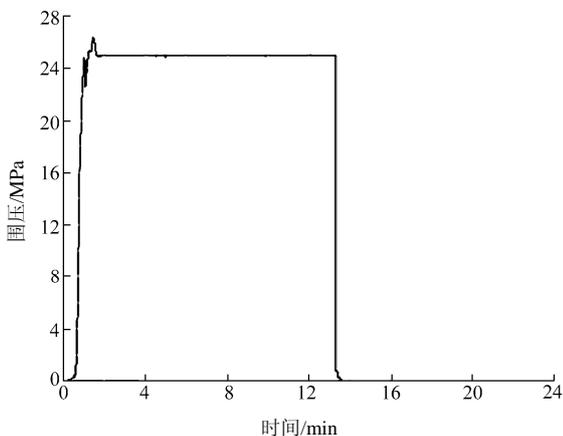
(e) 围压 15 MPa



(b) 围压 45 MPa



(c) 围压 35 MPa



(d) 围压 25 MPa

图 7 试验中压力监测曲线

Fig.7 Monitoring curves of pressures in test

试验过程中，进水端水压波动幅度小，基本稳定在 12 MPa 左右，出水端压力为 0；而围压以计算机控制，保持并稳定一段时间直至试验结束。试验结束后，以渗出水体积与相应时间计算不同围压下的渗透系数。不同围压下 3 种类型试样的渗透性试验结果如表 2 所示。根据表 2 中的数据，可分析其渗透特性变化特征。

表 2 渗透性试验结果

Table 2 Results of permeability test

试样类型	侧向应力/MPa	轴向应力/MPa	轴向应变/ 10^{-3}	进水孔水压/MPa	出水孔水压/MPa	水流量/mL	时间/min	渗透系数/ $(10^{-8} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$
I	15	2.71	4.61	12	0	39.00	6.10	1.404
	25	3.27	6.27	12	0	50.00	9.23	1.190
	35	4.02	8.41	12	0	44.50	15.26	0.640
	45	4.67	8.78	12	0	47.00	20.30	0.508
II	15	2.38	6.40	12	0	18.50	10.60	0.383
	25	2.84	8.03	12	0	25.00	18.20	0.302
	35	3.65	9.28	12	0	27.50	20.10	0.300
III	45	4.35	11.92	12	0	36.50	46.90	0.171
	15	2.01	5.14	12	0	43.00	5.63	1.677
	25	2.59	5.65	12	0	40.50	5.83	1.525
	35	3.08	7.37	12	0	43.00	6.50	1.453
	45	4.05	12.29	12	0	78.50	49.53	0.348

从表 2 中可以看出：

(1) 3 种类型试样中，侧向应力的增加均引起轴向应力的增加，且增加量分布比较均匀，轴向应力的波动幅度较小。比较单裂隙及双倍宽裂隙试样，

其轴向应力无明显倍数关系；单裂隙试样在不同围压下的轴向应力值高于交叉裂隙及双倍宽裂隙，其中，双倍宽裂隙试样在不同围压下的轴向应力值最低。

(2) 围压增加，试样轴向应变均呈增加趋势，而轴向应力呈减小趋势。15, 25 和 35 MPa 围压下，3 种类型试样的轴向应变增加较均匀；45 MPa 围压下，3 种类型试样的轴向应变比前 3 种围压下有了显著提高，特别是双倍宽裂隙试样的轴向应变增加了 68%。

(3) 渗透系数采用式(3)计算，取 $\mu = 1.009 \times 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ， $C_w = 4.75 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1[20]}$ 。从计算结果(见表 2)可以看出，围压的变化使试样的渗透性发生变化，随着围压的升高，试样的渗透系数表现为普遍降低，各围压下降低量比较均匀，但在 45 MPa 围压下，降低幅度比较大。在围压加载过程中，试样内部结构产生压缩变形，使裂隙及渗流通道变小，从而导致渗透性降低，说明侧向应力是影响同一类型试样渗透性变化幅度的决定性因素之一。对比 3 种类型试样，双倍宽裂隙试样的渗透系数明显大于另 2 种试样，其中，交叉裂隙试样的渗透系数最低。由此可见，在其他因素不变的情况下，充填裂隙宽度的增加 1 倍，其渗透系数变为原来的 1.2~2.3 倍；同时，裂隙交叉对渗流的影响也较大，局部水头的损失使得最终渗透性降低。说明在充填裂隙试样中，渗透面的几何特征也是影响其渗透性的决定性因素之一。

3.3 试验破坏分析

岩石强度主要受高压渗流的水化学损伤和水压力两方面作用的影响，而水压力又包含动水压力和静水压力。岩石三轴加载过程中有微裂纹产生，水压力使裂纹尖端的应力强度因子降低，当达到临界应力强度，裂纹即发生贯通、扩展、破坏，从而使岩石抗剪强度降低。水压力的作用集中体现在 3 个方面：(1) 裂纹面上的正压力和摩阻力受水压力作用而减小，进而影响裂纹尖端的应力强度因子；(2) 受孔隙水压力“楔入”作用的影响，裂纹的扩展加剧，从而产生渐进性破坏；(3) 水压力作用下，渗透水冲刷转移了裂隙及某些接触面上的颗粒物质，使岩石发生渗透变形，强度降低，从而产生变形破坏。因室内高渗压强度力学特性测试时间一般较短，渗透速度较小，在渗透溶液与所测试样无明显

的水-岩化学作用时，对强度的影响一般以静水压力为主。

不同试验条件下，各试样的破坏照片如图 8~11 所示，从图中可以看出，渗透水压基本相同条件下，不同充填裂隙试样的破裂形式略有不同。半贯通试样底部(即孔隙水流出端)的破坏照片见图 8，从中可以明显看到孔隙水贯通、冲刷试样后留下的凹洞。图 9(a), 10(a)中，在进水端试样的充填裂隙处，明显可以看到由于孔隙水作用带走充填裂隙内的可溶物质而产生的孔洞；同时，承压水通过该孔洞渗流入试样内部，进而促进试样的变形破坏。从图 9(a), 10(a)中还可以看出，与交叉裂隙试样相比，单裂隙试样的进水端孔隙水冲刷轨迹突出，破坏要稍严重些。图 9(b), 10(b)中，试样裂隙的分布情况较明显，可以看出纵向的拉张裂隙较多。

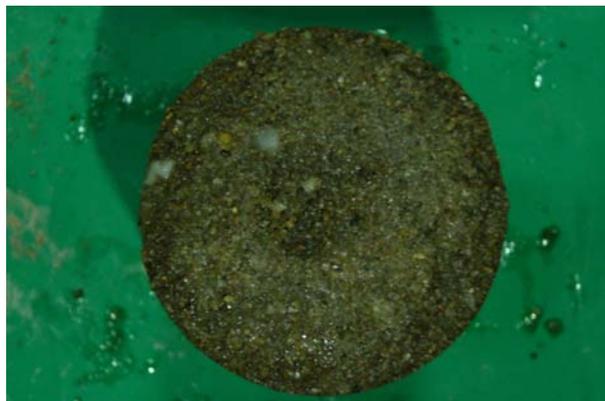


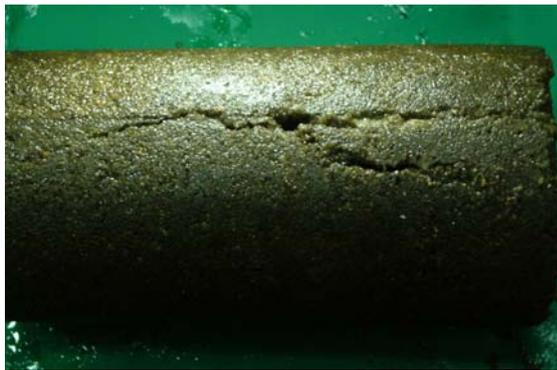
图 8 试样底端破坏照片

Fig.8 Failure photo of sample bottom

预置充填裂隙的类岩石试样的高渗压三轴加载试验中，充填物在水的作用下极易滑动或流失，渗透往往是沿其充填裂隙发生，并促进其发生变形破坏，而水压力对试样的破坏形式影响不大，高渗压



(a) 试样进水端受孔隙水压作用的破坏



(b) 试样破坏裂纹

图9 高渗透压力下单裂隙试样破坏照片

Fig.9 Failure photos of sample with single fracture under high permeability pressure



(a) 试样进水端受孔隙水压作用的破坏



(b) 试样破坏裂纹

图10 充填交叉隙高渗压试验破坏照片

Fig.10 Failure photos of sample with cross-fracture under high permeability pressure



(a) 围压 15 MPa 标准渗流破坏照片



(b) 围压 45 MPa 标准渗流破坏照片

图11 相同渗透压力下围压 15, 45 MPa 时试样破坏照片

Fig.11 Failure photos of samples under conditions of same permeability pressure and different confining pressures of 15 and 45 MPa

条件下均以剪张破坏为主。由图 11 可以发现，2 种不同侧向应力条件下试样的进水端裂纹张开不同，低围压下的试样纵向拉张裂纹相对较多，破坏要稍严重些，因此也造成渗透系数较高。

通过对不同试样在渗透性试验中的破坏形式综合分析，认为高渗压下三轴压缩以剪张性破坏为主，并沿剪切带伴随形成张开裂纹。格里菲斯破坏准则适用于描述该破坏形式。在压应力作用下，在与主应力方向夹角为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 的裂隙端部的切向拉应力最强，破裂首先出现在这些部位，并有多条次生拉张裂隙伴生。在孔隙水压力较高的情况下，剪切破坏的破坏形式将转换成以拉裂破坏为主，同时伴随有次生裂隙。在三轴压缩无水条件试验中，因为没有孔隙水的劈裂作用，以最初形成的沿裂隙方向的剪切破坏为试样的主要破坏形式。在孔隙水压力试验中，因侧向压力挤压作用强于高渗压下孔隙水的劈裂作用，仍以剪切破坏为主，与常规三轴破坏形式相似，但有较多的纵向拉裂破坏伴生。

通过对试样破坏分析，得出在高渗压下试样的破坏存在以下几种模式：(1) 主要破坏形式为剪切破坏，并有多条沿轴向张开裂隙伴生；(2) 针对一般沿轴向存在多个劈裂面的渗透孔隙性介质，在相同渗透水压条件下，破裂面的数量受所受侧向应力大小的影响；(3) 受自身梯度分布的影响，孔隙水压力在试样进水端相对要大些。因此，根据格里菲斯破坏原理可知，试样进水端在水压力的作用下破

裂较严重。

孔隙水压力在三轴加载过程中对试样产生一定的劈裂作用, 其作用机制为:

(1) 从水压力的大小上看, 水压力在试样孔隙中的存在会抵消部分轴向压力和侧向压力, 导致峰值强度低于无水压时。由莫尔 - 库仑定律可知, 由于试样轴向力和侧向力受孔隙水压的作用而减小, 使得试样强度更易达到极限值。压缩破坏时, 微裂纹的方向垂直于水压力在裂纹中的作用方向, 根据格里菲斯准则可知, 此时裂纹的劈裂过程会加剧。试样残余强度的大小还受水压力和各向等压的传递作用, 使试样由脆性破坏转变为延性破坏。

(2) 从压力梯度上看, 试样渗透性空间分布受裂纹演化和有效应力分布的影响变化较大, 表现出明显的压力梯度分布非线性。在整个试验加载过程中, 水流随着裂纹的萌生、扩展、演化, 逐步汇聚于裂隙中, 即孔隙水压力分布受变形破裂的局部化影响表现为非线性, 反之, 有效应力场的分布和裂纹的扩展模式又受水压力分布的影响。

充填物的存在削弱了试样的力学强度。试验中, 脱水的充填物产生强烈的吸水现象, 导致层间吸附水厚度增加、颗粒周围结合水膜的厚度加大以及水侵入材料内部, 从而伴随产生颗粒间结合水的巨大楔压, 导致充填物膨胀, 与此相伴而产生的膨胀力是很大的, 从而使力学性能已经减弱的岩体进一步弱化。

4 结 论

采用自主研发的三轴压缩渗流试验仪器, 分别针对含充填物的单裂隙、交叉裂隙和双倍宽裂隙 3 种类型试样, 在水压 12 MPa 及围压 15, 25, 35, 45 MPa 下进行渗透性试验, 取得了以下研究成果:

(1) 3 种类型试样的轴向应力随着围压的升高呈增加的趋势, 但波动幅度较小; 同时, 轴向应力的变化受节理组数和隙宽的影响不突出, 未出现因节理增加或隙宽增大而产生的应力值明显削弱。

(2) 在稳定水压的条件下, 3 种类型充填裂隙试样的渗透系数随着围压的升高呈下降的趋势, 但下

降的幅度不均匀, 但其数量级始终保持一致。

(3) 渗透结构面几何特征是影响试样渗透性的主要因素之一。3 种充填裂隙试样中, 裂隙宽度加倍试样的渗透性比单倍宽裂隙试样的高, 而交叉裂隙的试样的渗透性较单裂隙的则明显降低。

(4) 岩石的渗透性受多种因素影响, 对于渗透性变化特征的研究应在试验的基础上, 从而得出不同影响因素下的变化趋势。

参考文献(References):

- [1] IWAI K. Fundamental studies of fluid through a single fracture[Ph. D. Thesis][D]. Berkeley: University of California, Berkeley, 1976.
- [2] SCHRAUF T W. Laboratory studies of gas flow through a single natural fracture[J]. Water Resources Research, 1986, 22(7): 1 083.
- [3] BANDIS S C, LUMSDER C, BARTON N R. Fundamentals of rock joint deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20(6): 249 - 268.
- [4] 刘继山. 结构面力学参数与水力参数耦合关系及其应用[J]. 水文地质与工程地质, 1988, (2): 7 - 11.(LIU Jishan. The coupled relationships between mechanical parameters and hydraulic ones of a structural surface and their applications[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1988, (2): 7 - 11.(in Chinese))
- [5] 刘继山. 单裂隙受正应力作用时的渗流公式[J]. 水文地质与工程地质, 1987, (2): 32 - 33.(LIU Jishan. Seepage equation of single fracture under normal stress[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1987, (2): 32 - 33.(in Chinese))
- [6] 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特征[J]. 地质学报, 1986, 66(2): 202 - 214.(TIAN Kaiming. The hydraulic properties of crossing-flow in an intersected fracture[J]. Acta Geologica Sinica, 1986, 66(2): 202 - 214.(in Chinese))
- [7] BRACE W F, WALSH J B, FANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(6): 2 225 - 2 236.
- [8] OLSEN H W. Darcy law in saturated Kaolinite[J]. Water Resources 1966, 2(6): 287 - 295.
- [9] 陈红江. 裂隙岩体应力 - 损伤 - 渗流耦合理论、试验及工程应用研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2010.(CHEN Hongjiang. Research on coupling theory and test of stress-damage-seepage in fractured rock masses and its engineering application[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2010.(in Chinese))

- [10] EINSTEIN H H, HIRSCHFELD R C. Model studies of jointed-rock behavior(Abstract)[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(3): 229 - 248.
- [11] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 229 - 241.
- [12] 车法星, 黎立云, 刘大安. 类岩材料多裂纹体断裂破坏试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 295 - 298.(CHE Faxing, LI Liyun, LIU Daan. Fracture experiments and finite element analysis for multi-cracks body of rock-like material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 295 - 298.(in Chinese))
- [13] 刘爱华, 罗荣武, 黎 鸿, 等. 人工非贯通节理试样力学强度特征试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(6): 726 - 730.(LIU Aihua, LUO Rongwu, LI Hong, et al. Strength features of testing samples with prefabricated discontinuous joints[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(6): 726 - 730.(in Chinese))
- [14] 李晓红, 卢义玉, 康 勇, 等. 岩石力学实验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 35 - 40.(LI Xiaohong, LU Yiyu, KANG Yong, et al. Rock mechanics experiment simulation technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 35 - 40.(in Chinese))
- [15] 李小春, 高桥学, 吴智深, 等. 瞬态压力脉冲法及其在岩石三轴试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增2): 1 725 - 1 733.(LI Xiaochun, TAKAHASHI M, WU Zhishen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp. 2): 1 725 - 1 733.(in Chinese))
- [16] 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.(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.(in Chinese))
- [17] 韩小妹, 王恩志, 刘庆杰. 低渗透岩石的单相水非 Darcy 流[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(6): 804 - 807.(HAN Xiaomei, WANG Enzhi, LIU Qingjie. Non-Darcy flow of single-phase water through low permeability rock[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(6): 804 - 807.(in Chinese))
- [18] ZHANG M, ESAKI T, OLSEN H W, et al. Integrated shear and flow parameter measurement[J]. Geotechnical Testing Journal, 1997, 20(3): 296 - 306.
- [19] KRANZ R L, SALTZMAN J S, BLACIC J D. Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using oscillating pore pressure method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract, 1990, 27(5): 345 - 356.
- [20] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 14 - 18.(KONG Xiangyan. Advanced fluid mechanics in porous[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999: 14 - 18.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 国标《工程岩体分级标准》的应用与进展;
- (2) 深埋隧洞大理岩卸载路径真三轴强度参数研究;
- (3) 经山寺铁矿优化开采综合爆破技术;
- (4) 厚壁圆筒式两相流体致裂仪研制;
- (5) 粗糙节理剪切力学性质的颗粒流数值模拟;
- (6) 基于细观数值试验的非饱和土石混合体力学特性研究;
- (7) 裂隙岩体深埋长隧洞断裂控水模型及突涌水量多因素综合预测;
- (8) 考虑黏聚特性和拉压不等效应的修正剑桥模型及数值实现;
- (9) 单参数的正则抛物线准则。