

DOI: 10.11779/CJGE201706020

贯通充填裂隙类岩石渗流特性试验研究

赵 恺¹, 王环玲^{*1}, 徐卫亚², 夏 季¹

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

摘 要: 利用3D打印技术制作平行、合并、T型、斜交以及正交裂隙, 通过模具浇筑成贯通充填裂隙类岩石试样, 应用低渗透岩石惰性气体渗透测试系统测试不同围压加卸载条件下贯通充填裂隙类岩石渗流特性, 研究具有不同渗透结构面试样在不同围压作用下气体渗透率的变化规律。通过试验研究发现: 充填物相同情况下, 开度相同, 形式不同的渗透结构面试样渗透率不同, 但数量级上不存在差异, 以围压加载25 MPa为例, 平行裂隙试样渗透率最大, 合并裂隙试样渗透率最小; 试样渗透率随围压变化曲线在围压加载阶段高于卸载阶段, 不同渗透结构面试样渗透率随围压变化波动幅度不同; 围压加载阶段贯通充填裂隙类岩石渗透率与围压关系符合多项式函数; 不同试样渗透率对应力敏感系数随围压变化曲线在围压加载阶段变化趋势不尽相同, 在围压卸载阶段各曲线变化趋于接近, 呈“W”型, 贯通充填裂隙类岩石渗透率对应力敏感性受渗透结构面影响。

关键词: 气体渗透率; 围压加卸载; 贯通充填裂隙; 渗透结构面

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)06-1130-07

作者简介: 赵 恺(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程研究。E-mail: ztzhakai@163.com。

Experimental study on seepage characteristics of rock-like materials with consecutive and filling fractures

ZHAO Kai¹, WANG Huan-ling¹, XU Wei-ya², XIA Ji¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: 3D printing is used to produce different permeability structural surfaces, and rock-like samples are poured by moulds. The tests on permeability of rock-like samples with consecutive and filling fractures are carried out under loading and unloading pressures. The test system of gas permeability measurement for compact rock is applied in measuring the evolution of gas permeability of structural surface with different permeabilities under different confining pressures. The test results show that the permeabilities of samples with different filling fractures are different, but there is no difference in magnitude when the pressure changes. For example, under the confining pressure of 25 MPa, the permeabilities of samples with parallel fractures and combined fractures are the maximum and minimum values respectively. The variation curves of samples between permeability and pressure in loading process are higher than those in unloading process. The evolution of permeability of samples under different pressures is influenced by the geometrical characteristics of permeability structural surface. In the process of loading, the variation curves between stress sensitive coefficient and pressure of different samples change in a different trend. While in the process of unloading, the variation curves are almost the same and present a 'W' form, and the permeability stress sensitivity of rock-like samples with consecutive and filling fractures is influenced by the permeability structural surface.

Key words: gas permeability; loading and unloading of confining pressure; consecutive and filling fracture; permeability structural surface

0 引 言

岩石裂隙渗流特性研究对资源安全、高效开发以及工程设计安全具有重要意义, 因裂隙岩体渗流导致工程失事在国内外屡见不鲜: 1959年法国马尔巴塞拱坝溃决, 1963年意大利瓦里昂拱坝库滑坡, 以及1963

年中国梅山连拱坝发生漏水险情等问题的出现, 使人

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572110, 51479049, 51309243); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016B05314)

收稿日期: 2016-07-12

***通讯作者** (E-mail: wanghuanling@hhu.edu.cn)

们更加重视对该领域的研究。

近年来国内外学者对于单裂隙及交叉裂隙岩体进行了深入的研究, Lomize^[1]、Louis 等^[2]在水流试验的基础上验证了立方定律对单裂隙渗流的有效性; 速宝玉等^[3]利用平行板物理模型试验初步探讨裂隙渗流机理并总结出立方定律的修正公式; 许光祥等^[4]通过多种裂隙试件渗流试验, 总结出适用粗糙裂隙渗流的超立方与次立方定律; 田开铭^[5]通过平行板裂隙模型试验, 初步揭示出裂隙水交叉流的水力特性。Olsson 等^[6]通过剪切花岗岩节理试验, 研究了在一定荷载下节理岩体渗流特性。Lee 等^[7]分析了剪切荷载作用下粗糙裂隙中的水力特性。岩石裂隙通常存在充填介质, 充填裂隙渗流具有较大差异性。速宝玉等^[8]通过玻璃板充填砂渗流模型试验, 得到充填物的颗粒成分及孔隙度是影响充填裂隙渗透性的重要因素; 于龙等^[9]通过平行板填砂试验, 得到隙宽与颗粒尺度比对充填裂隙渗流规律有极大影响; 刘才华等^[10]通过充填砂裂隙剪切渗流试验, 提出沙砾扰动与孔隙比增大会引起裂隙流量的变化。

鉴于天然岩石试样结构的复杂性, 现场所取岩样具有随机性与不可重复性, 在研究裂隙对岩体渗透性质的影响时, 会使试验结果产生偏差。现场取样困难且成本较大, 因此目前对裂隙岩体渗透特性的室内试验研究多以类岩石材料制作裂隙岩体模型进行研究。刘欣宇等^[11]通过相似材料制作含充填物裂隙类岩石试样进行渗透性试验, 发现了试样的渗透率受到围压和渗透结构面几何特征的影响; 李夕兵等^[12]通过对应力场和渗流场共同作用下的含裂隙类岩石材料进行研究, 得到了岩石裂纹的启裂强度随渗透水压升高而降低。上述研究在充填裂隙岩体渗透特性方面取得了较为丰富成果, 在不同围压作用下贯通充填裂隙类岩石渗流规律还处于探索阶段。

本文利用 3D 打印技术制作平行、合并、T 型、斜交以及正交裂隙, 通过模具浇筑成贯通充填裂隙类岩石试样, 对所制备的贯通充填裂隙类岩石试样进行围压加载及卸载渗透性试验研究, 研究不同渗透结构面贯通充填裂隙类岩石在不同应力作用下所表现出的渗透变化规律。

1 试验设计

1.1 试样设计

使用 SolidWorks 软件构建裂隙插片三维模型, 然后通过 3D 打印技术制作裂隙插片。斜交裂隙插片如图 1 (a) 所示。

使用本实验室模具浇筑试验试样。模具由树脂材

料通过 3D 打印制成, 模具如图 1 (b) 所示。

浇筑试样时, 模具内部需均匀涂抹凡士林, 以便于试样成型后脱模; 同时将硅酸盐水泥、河砂、水以质量比为 1 : 0.5 : 0.4 混合, 加入相当于总质量 0.2% 的防渗剂与减水剂以增强试样抗渗能力与流动性, 并加入少量消泡剂以抑制试样制作过程中有害气泡的产生, 搅拌均匀后倒入模具内并插捣密实, 插入表面涂有凡士林的插片。制作过程如图 1 所示。

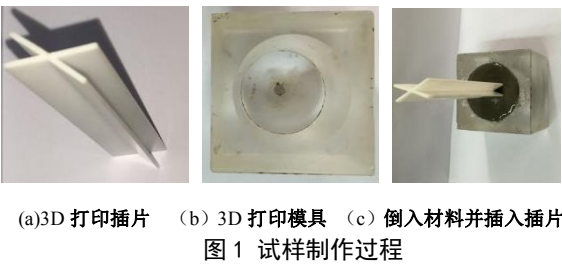


Fig. 1 Process of sample preparation

试样制作完成后, 干燥 24 h 进行脱模。模具底部留有小孔, 空气压缩装置通过该小孔向模具内鼓入空气, 试样在空气压力的作用下脱离模具。待试样脱模后, 将插片从试样内拔出, 即可形成预制贯通裂隙。同时向预制贯通裂隙灌注粒径为 0.0026~0.003 mm 的微粉碳酸钙, 该粒径微粉碳酸钙可密实充填于裂隙中。静置于恒温恒湿箱以温度 28℃, 湿度 95% 养护 30 d。完成的试样如图 2 所示。岩样物理参数见表 1。



图 2 不同贯通裂隙试样

Fig. 2 Different consecutive crack samples

表 1 试样物理参数

Table 1 Physical parameters of samples

岩样 编号	高度 /mm	直径 /mm	质量 /g	密度 /(g·cm ⁻³)
A1	49.98	50.54	188.62	1.90
A2	49.81	49.58	188.59	1.97
A3	50.24	49.94	184.50	1.88
A4	50.75	49.91	189.89	1.91
A5	49.67	49.81	186.95	1.93

1.2 试验仪器

本文贯通充填裂隙类岩石渗流试验利用高精度致密岩石惰性气体渗透测试系统完成。该试验仪器主要

构造为压力室、围压控制系统、气体渗压调节系统、控制板、与精密气压记录仪^[11]。围压加载范围为 0~60 MPa, 适用于致密岩石介质渗透率的测量, 测量精度可达 10~24 m²。试验进行需保持恒定温度 25℃。为保证测量结果的可靠性, 避免渗透介质与岩石试样发生化学反应产生误差, 试验渗流气体选用氩气。根据所测试岩石介质渗透率等级, 可选用稳态法、脉冲法、气体流量法等不同测试方法^[12]。试验装置如图 3 所示。

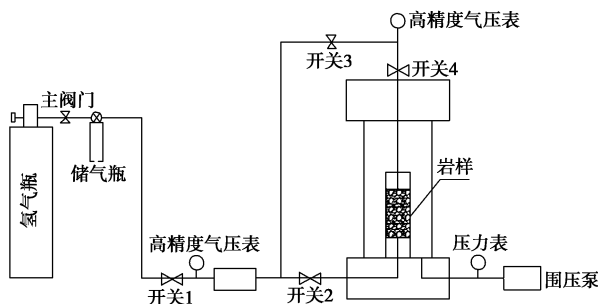


图 3 低渗透岩石惰性气体渗透测试系统

Fig. 3 Low-permeability rock inert gas permeability measuring system

2 渗透性试验研究

2.1 气体渗透率试验测试原理

本文测试方法选用气体流量法, 其试验原理如图 4 所示, 控制压力室上游进气端(试样下表面)气体压力, 在压力室下游出气端(试样上表面)设置一个高精度气体流量计, 用以测量一段时间内的气体压力变化, 从而计算岩样的气体渗透率。岩样气体渗透率公式^[11]为

$$k = \frac{2\mu L \Delta p_{in}}{A(p_i^2 - p_0^2)\Delta t} \quad (1)$$

式中 μ 为气体动力黏度(Pa·s); L 为岩样长度(m); Δp_{in} 为进气端压力变化量(MPa); p_0 是大气压力取 0.1 MPa; A 为岩样的横截面面积(m²); t 为渗流时间(s); p_i 是 $t=\Delta t$ 时刻的进气端压力平均值(MPa)。

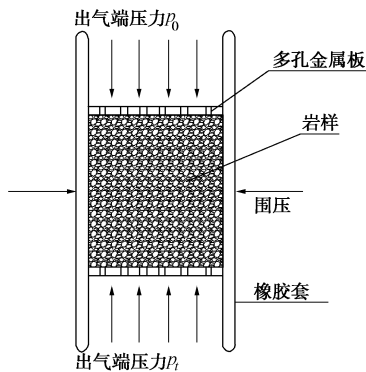


图 4 岩样气体渗透原理示意图

Fig. 4 Diagrammatic drawing of gas permeability

2.2 渗透性试验方案

贯通充填裂隙岩体在应力改变时裂隙闭合度发生变化, 充填介质孔隙结构也随之改变影响裂隙岩体渗流特性。研究不同等级围压下贯通含充填类岩石的渗透特性具有重要意义。本文在不同等级围压下对不同渗透结构面的贯通充填裂隙类岩石试样进行渗透率测试研究, 试样特征如表 2 所示。

表 2 试样特征

Table 2 Characteristics of samples

试样编号	试样类型	渗透结构面几何特征
A1	平行裂隙	试样内分布两组贯通的平直结构面, 开度为 1.5 mm, 开裂结构面内密实充填微粉碳酸钙成分
A2	合并裂隙	试样内分布一组贯通的平直结构面, 开度为 3 mm, 开裂结构面内密实充填微粉碳酸钙
A3	T 形裂隙	试样内分布两组贯通且呈 T 型平直结构面, 开度为 1.5 mm, 开裂结构面内密实充填微粉碳酸钙
A4	斜交裂隙	试样内分布两组贯通且夹角为 45° 的平直结构面, 开度为 1.5 mm, 开裂结构面内密实充填微粉碳酸钙
A5	正交裂隙	试样内分布两组贯通且夹角为 90° 的平直结构面, 开度为 1.5 mm, 开裂结构面内密实充填微粉碳酸钙

试验在气体渗透压力 1 MPa, 不同等级围压(3~45 MPa)进行。试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案

Table 3 Testing program

试样编号	气体渗压/MPa	围压/MPa
A1	1	3, 8, 15 25, 35, 45
A2		
A3		
A4		
A5		

3 试验结果分析

3.1 贯通充填裂隙类岩石渗透率随围压变化规律

根据试验结果绘制出平行、合并、T 型、斜交、正交贯通充填裂隙试样渗透率与围压关系曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可得, 渗透结构面不同的试样在同一等级围压下的渗透率不同, 但不存在数量级上的差异。围压为 25 MPa 时, 平行裂隙试样的渗透率为 6.46×10^{-17} m², 合并裂隙试样的渗透率为 4.25×10^{-17} m², T 型裂

隙试样的渗透率为 $5.77 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 斜交裂隙试样的渗透率为 $5.35 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 正交裂隙试样的渗透率为 $4.85 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 渗透率最大值与最小值的试样分别为平行裂隙试样与合并裂隙试样。贯通充填裂隙类岩石的渗透率与渗透结构面相关。

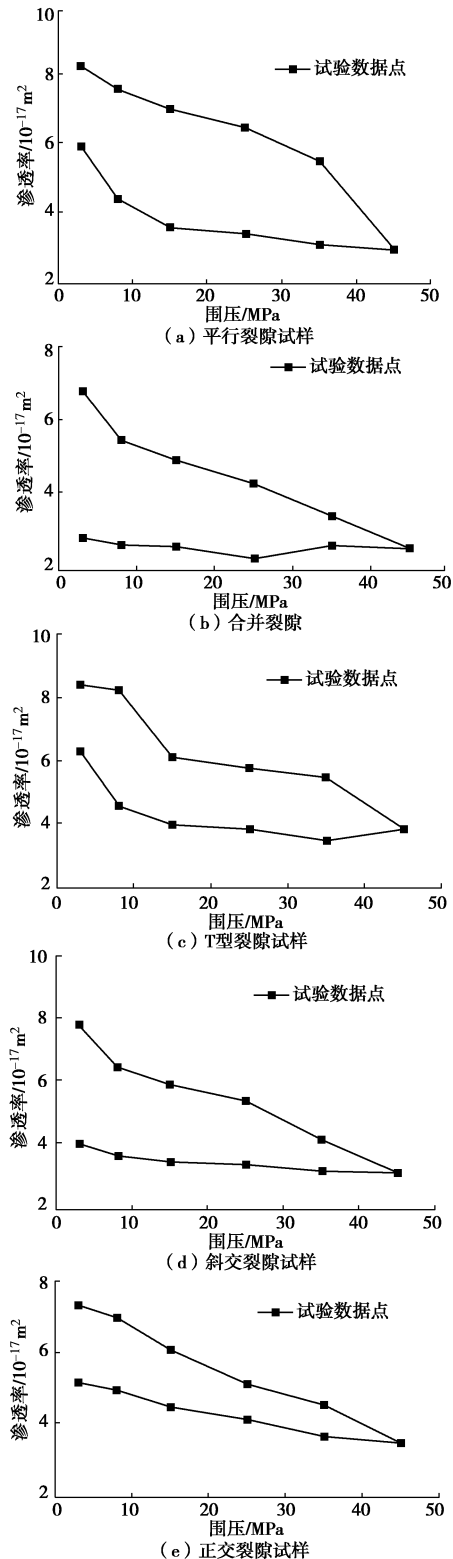


图5 贯通充填裂隙类岩石渗透率随围压变化曲线

Fig. 5 Variation curves between permeability and pressure of rock-like samples with consecutive filling fractures

试样气体渗透率在围压等级改变情况下随之发生变化。在围压加载阶段, 试样气体渗透率随围压增大而减小; 在围压卸载阶段, 除合并裂隙试样气体渗透率未随围压释放升高外, 其他试样气体渗透率随围压回落在一定程度上有所恢复, 试样渗透率随围压变化曲线在围压加载阶段要高于围压卸载阶段。试样在围压作用下, 充填裂隙隙宽减小, 充填介质被压密孔隙度减小, 故在围压加载阶段渗透率随围压等级增大而减小; 在围压卸载阶段随着围压释放, 充填裂隙隙宽略有恢复, 充填介质孔隙度增大, 故渗透率随围压减小而增大。充填介质的空间结构在围压作用下受到破坏发生不可恢复的塑性变形, 关闭的渗流通道在围压释放后仍无法重新张开, 故渗透率在围压卸载阶段较小。

围压加载初期, 贯通充填裂隙试样渗透率降低速度较快, 随围压逐步增大试样渗透率降低速度减缓, 平行贯通充填裂隙试样与T型贯通充填裂隙试样在围压升至45 MPa时, 渗透率有较大幅度的降低。在围压加载初期(3~15 MPa), 充填裂隙受到压缩发生变形, 充填介质被压密, 孔隙率降低, 渗流通道变小导致渗透率降低速度较快; 围压加载中后期(15~45 MPa)试样内部结构较为稳定, 裂隙及渗流通道所能改变的流通能力较小, 所以渗透率随围压升高降低速度减缓。平行裂隙试样与T型裂隙试样在高围压作用下, 裂隙中的充填材料结构遭到破坏, 已有渗流通道大量关闭, 使得渗透率有较大幅度的减小。说明围压对贯通充填裂隙类岩石渗流特性起决定性作用。

现将围压加载过程中第一级围压与最后一级围压下渗透率的差值与初始渗透率(本文以围压加载3 MPa下渗透率作为初始渗透率)的比值作为渗透率的降低程度(第一级围压为3 MPa, 最后一级围压为45 MPa), 以反映经围压加载不同渗透结构面试样所受影响程度, 得到A1~A5试验渗透率降低程度依次为64.2%, 63.8%, 54.2%, 60.8%, 52.7%。

试验结果可知, 不同渗透结构面的贯通充填裂隙岩样渗透率最大降低程度介于52.7%~64.2%, 可见围压对贯通充填裂隙试样渗透率的影响较大, 充填介质内部结构对渗流影响大, 且不同渗透结构面受到的影响程度也存在差异性。

3.2 渗透结构面对贯通充填裂隙类岩石渗透率的影响

将试样在围压加载阶段与围压卸载阶段的渗透率与围压关系曲线分别绘制在相同坐标系内, 以做进一步的分析, 如图6所示。

如图6所示在围压加载阶段, 围压等级升高不同渗透结构面试样渗透率下降趋势基本相同, 除平行裂

隙试样与 T 型裂隙试样渗透率在个别围压点有较大幅度的下降外,其余试样渗透率都以较为平稳速率减小。平行裂隙试样在围压加载初始阶段渗透率较高,随围压升高渗透率降幅较大,45 MPa 围压下渗透率相对较低;合并裂隙试样渗透率始终最小。而正交裂隙与斜交裂隙试样渗透率相差不大,渗透率随围压变化曲线时有相交,说明在围压加载阶段交叉裂隙所成角度对贯通充填裂隙类岩石渗透率影响较小。

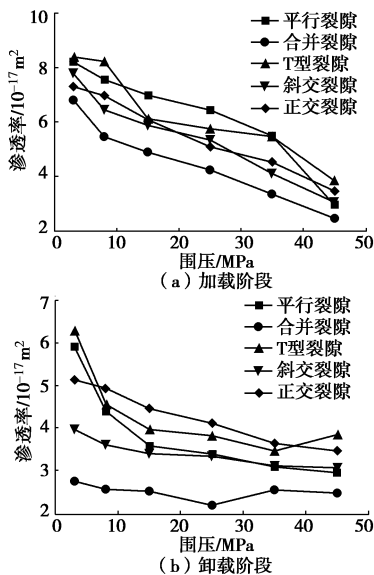


图 6 不同渗透结构面试样渗透率随围压变化曲线

Fig. 6 Variation curves between permeability and pressure of samples with different permeability structural surfaces

在围压卸载阶段,随围压降低各试样渗透率变化趋势不尽相同。合并裂隙试样随围压降低,其渗透率基本不变,表明在围压的作用下其结构发生了不可逆的塑性变化,围压释放其渗透率很难得到恢复。围压回落,正交裂隙试样渗透率相对高于斜交裂隙试样,恢复速率也相对较大,说明在围压卸载阶段交叉裂隙所成角度会对贯通充填裂隙类岩石渗透率产生一定程度的影响。而 T 型裂隙试样与平行裂隙试样在围压卸载初期渗透率以较慢速率回升,围压降低至 15 MPa 后,渗透率有较大幅度增长,存在应力滞后效应。

3.3 贯通充填裂隙类岩石渗透率与围压函数关系

由文献[13~17]的研究可得,关于岩石渗透率与围压关系如下所示:

$$K = K_0 p_c^{-a} \quad (\text{幂函数关系}), \tag{2}$$

$$K = K_0 e^{-bp_c} \quad (\text{指数函数关系}), \tag{3}$$

$$K = ap_c^2 + bp_c + K_0 \quad (\text{多项式函数关系}), \tag{4}$$

式中, K 为渗透率, P_c 为围压, a , b 为参数, K_0 为初始渗透率。

对本次贯通充填裂隙类岩石渗流数据进行拟合,得到在围压加载阶段,一元二次多项式的曲线拟合程

度较好。为提高拟合精度,且使拟合曲线更为平滑逼近于试验趋向,以常数 c 取代初始渗透率 K_0 。拟合结果见图 7 和表 4。

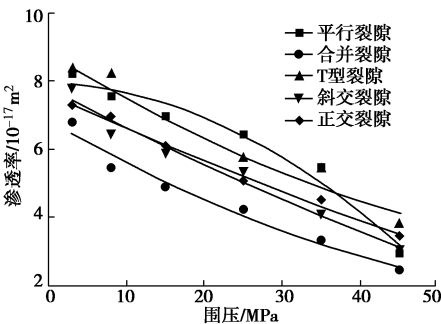


图 7 贯通充填裂隙类岩石渗透率与围压关系拟合曲线图

Fig. 7 Fitting curves between permeability and pressure of rock-like samples with consecutive filling fractures

表 4 试样渗透率与围压(加载阶段)多项式拟合结果

Table 4 Fitting results of permeability and confining pressure of samples in loading process

试样 编号	回归系数			拟合度 /%	K_0	$\frac{ c - K_0 }{K_0} \times 100\%$
	a	b	c			
A1	-0.00219	-0.0076	7.97	94.81	8.23	3.16
A2	0.00085	-0.1338	6.87	95.13	6.80	1.03
A3	0.00089	-0.1447	8.85	86.13	8.40	5.36
A4	0.00034	-0.1186	7.79	94.84	7.80	0.13
A5	0.00030	-0.1057	7.67	98.84	7.32	4.78

由表 6 可得,试样曲线拟合度都高于 86%,拟合效果较好。拟合常数项 c 和 K_0 误差较小,低于 6%,所以可用 $K = ap_c^2 + bp_c + c$ 对贯通充填裂隙类岩石的渗透率与围压进行拟合。

3.4 渗透结构面对贯通充填裂隙类岩石渗透率对应力敏感系数的影响

贯通充填裂隙类岩石渗透性的影响因素较多,很难逐一描述清楚。现定义渗透率对应力的敏感系数 C_k ,对贯通充填裂隙类岩石渗透率影响因素归一化处理^[18-19]:

$$C_k = -\frac{1}{K_0} \frac{\partial K}{\partial p} \tag{5}$$

敏感系数 C_k 可反映岩石渗透率对应力变化所具有的敏感性,若其值较大则表明岩石渗透率对应力变化较为敏感,反之则表示岩石渗透率对应力变化敏感性不高。

将试样在围压加载阶段与围压卸载阶段的渗透率对应力敏感系数与围压关系曲线图分别绘制在相同坐标系内,如图 8 所示。

由图 8 可得,在围压加载阶段合并裂隙试样、斜交裂隙试样与平行裂隙试样在低等级围压条件下应力

敏感系数较大, 随着围压等级逐渐增大有较大幅度降落, 在围压加载中后期偏于稳定, 而平行裂隙试样在围压加载最后一级的时候有较大幅度升高且高于初始值。正交裂隙试样在围压加载初期应力敏感系数较低, 随围压逐渐有较大幅度升高随后趋于稳定。T 型裂隙试样渗透率对应力敏感系数随围压变化曲线波动幅度较大。贯通充填裂隙类岩石应力敏感系数随裂隙交叉角度不同, 在围压加载初期表现出截然相反的趋势, 随围压等级逐渐升高相近。

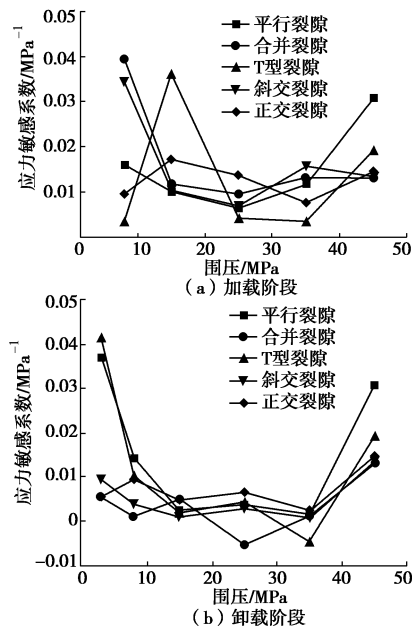


图8 贯通充填裂隙类岩石应力敏感系数随围压变化曲线

Fig. 8 Variation curves between stress sensitive coefficient and pressure of rock-like samples with consecutive filling fractures

在围压卸载阶段, 不同试样的渗透率对应力敏感系数随围压变化曲线基本一致, 呈现出“W”型。即在围压卸载初期有较大幅度降低, 在围压卸载中期有较小幅度波动, 在围压卸载后期有较大幅度升高。说明经过围压加卸载后不同试样渗透率对应力的敏感系数发生了较大变化, 且渗透结构面不同, 表现出了不同的变化趋势。

4 结 论

通过致密岩石惰性气体渗透测试系统, 分别对贯通含充填物的平行裂隙、双倍宽裂隙、T 型裂隙、斜交裂隙、正交裂隙 5 种类型试样, 在气体渗透压力 1 MPa 及围压 3~45 MPa 下进行渗透性试验, 取得了如下 4 点结论。

(1) 贯通充填裂隙的存在极大的改变了岩体的渗透特性, 不同渗透结构面试样渗透率不同, 但不存在数量级上的差异。

(2) 在围压加载阶段, 贯通充填裂隙试样的渗透

率在围压等级升高的情况下减小, 在围压卸载阶段, 除合并裂隙试样在围压回落后渗透率未升高外, 其他试样渗透率随围压下降逐步恢复但低于加载阶段, 渗透率降低程度在渗透结构面改变时会发生改变。

(3) 在围压加载阶段, 贯通充填裂隙类岩石渗透率与围压关系可用一元二次多项式进行拟合。

(4) 贯通充填裂隙类岩石渗透率对应力敏感性在围压加载阶段在渗透结构面改变情况下随之发生变化, 围压卸载阶段各试样渗透率对应力敏感性随围压变化曲线趋于相同, 呈“W”型。

参考文献:

- [1] LOMIZE G M. Flow in fractured rocks[J]. Gosenergoizdat, Moscow, 1951, 127: 197.
- [2] LOUIS C, MAINI Y N. Determination of in-situ hydraulic parameters in jointed rock[J]. International Society of Rock Mechanics, Proceedings, 1970, 1: 1 - 19.
- [3] 速宝玉, 詹美礼, 赵 坚. 仿天然岩体裂隙渗流的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 19 - 24. (SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHAO Jian. Study on fracture seepage in the Imitative nature roke[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 19 - 24. 4. (in Chinese))
- [4] 许光祥, 张永兴, 哈秋龄. 粗糙裂隙渗流的超立方和次立方定律及其试验研究[J]. 水利学报, 2003(3): 74 - 79. (XU Guang-xiang, ZHANG Yong-xing, HA Qiu-ling. Super-cubic and sub-cubic law of rough fracture seepage and its experiments study[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(3): 74 - 79. (in Chinese))
- [5] 田开铭. 裂隙水交叉流的水力特性[J]. 地质学报, 1986(2): 202 - 214. (TIAN Kai-ming. The hydraulic properties of crossing-flow in an intersected fracture [J]. Acta Geologica Sinica, 1986(2): 202 - 214. (in Chinese))
- [6] OLSSON R, BARTON N. An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(3): 317 - 329.
- [7] LEE H S, CHO T F. Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2002, 35(4): 299 - 318.
- [8] 速宝玉, 詹美礼, 张祝添. 充填裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 46 - 52. (SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHANG Zhu-tian. Experimental research of seepage characteristic for filled fracture[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(4): 46 - 52. (in Chinese))
- [9] 于 龙, 陶同康. 岩体裂隙水流的运动规律[J]. 水利水电科

- 学研究, 1997(3): 208 - 218. (YU Long, TAO Tong-kang. Law of flow movement for rock fractures[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1997(3): 208 - 218. (in Chinese))
- [10] 刘才华, 陈从新, 付少兰. 充填砂裂隙在剪切位移作用下渗流规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(10): 1457 - 1461. (LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FU Shao-lan. Study on seepage characteristics of a single rock fracture under shear stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(10): 1457 - 1461. (in Chinese))
- [11] 刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 高围压条件下含充填裂隙类岩石水渗流试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(7): 1390 - 1398. (LIU Xin-yu, LIU Ai-hua, LI Xi-bing. Experimental study of permeability of rock-like material with filling fractures under high confining pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(7): 1390 - 1398. (in Chinese))
- [12] 李夕兵, 贺显群, 陈红江. 渗透水压作用下类岩石材料张开型裂纹启裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(7): 1317 - 1324. (LI Xi-bing, HE Xian-qun, CHEN Hong-jiang. Experimental study of permeability of rock-like material with filling fractures under high confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(7): 1317 - 1324. (in Chinese))
- [13] 王环玲, 徐卫亚, 左 婧, 等. 低渗透岩石渗透率与孔隙率演化规律的气渗试验研究[J]. 水利学报, 2015, **46**(2): 208 - 216. (WANG Huan-ling, XU Wei-ya, ZUO Jing, et al. Evolution law of the permeability and porosity for low-permeability rock based on gas permeability test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, **46**(2): 208 - 216. (in Chinese))
- [14] 王环玲, 徐卫亚. 致密岩石渗透测试与渗流力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 24 - 29. (WANG Huan-ling, XU Wei-ya. Permeability test of tight rock and the mechanical properties of porous flow[M]. Beijing: Science Press, 2015: 24 - 29. (in Chinese))
- [15] MILLER R J, LOW P F. Threshold gradient for water flow in clay systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1963, **27**(6): 605 - 609.
- [16] MCKEE C R, BUMB A C, KOENIG R A. Stress-dependent permeability and porosity of coal[C]//International Coalbed Methane Symposium, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama. 1987: 183 - 193.
- [17] 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 University (Science & Technology Edition), 1999, **21**(4): 23 - 25. (in Chinese))
- [18] 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 pressure on porosity and permeability of low permeability porous media[J]. Journal of Geomechanics, 2001, **7**(1): 41 - 44. (in Chinese))
- [19] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率与有效围压关系的试验研究[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, **47**(3): 340 - 343. (HUANG Yuan-zhi, WANG En-zhi. Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, **47**(3): 340 - 343. (in Chinese))
- [20] 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]. 岩石力学与工程学报, 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, **47**(3): 410 - 414. (in Chinese))
- [21] 熊 伟. 流固耦合渗流规律研究[D]. 北京: 中国科学院渗流力学研究所, 2002. (XIONG Wei. Study on fluid-solid coupling seepage law[D]. Beijing: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese))