

DOI: 10.11779/CJGE20220910

# 围压和渗压加卸载作用下石灰岩裂隙渗流特性试验研究

甘 磊, 金洪杰, 沈振中\*, 徐 磊, 马洪影

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 裂隙面粗糙程度和加卸载环境对裂隙渗流特性的影响不可忽视。为研究不同裂隙面节理粗糙度系数 (JRC) 和围压、渗透压力 (渗压) 加卸载对石灰岩粗糙单裂隙渗流演化规律的影响, 制备 5 组不同 JRC 石灰岩单裂隙试样, 利用自研岩体裂隙渗流试验系统, 开展了不同 JRC 裂隙试样在围压、渗压加卸载作用下的渗流试验研究。结果表明: 不同 JRC 裂隙试样的渗流量和渗透率随围压增大而减小, 加载时各试样渗透率均与围压呈幂函数关系,  $R^2$  最小为 0.9583, 围压卸荷时存在明显滞回效应, 卸载时 JRC 对滞回程度影响较大, 与下降量和回升量呈对数关系; 渗压加卸载过程, 裂隙渗流量变化同渗压正相关, 渗透率持续下降; 一次渗压加卸载循环后的裂隙渗流量下降值与 JRC 相关性良好, 提出了渗压加卸载后的裂隙渗流量预测模型。

**关键词:** 石灰岩; 粗糙裂隙; 围压; 渗压; 加卸载; 渗流试验

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)10-2062-10

作者简介: 甘 磊(1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程渗流分析方面的教研工作。E-mail: ganlei2015@hhu.edu.cn。

## Experimental study on seepage characteristics of rough fracture of limestone under loading-unloading of confining and osmotic pressures

GAN Lei, JIN Hongjie, SHEN Zhenzhong, XU LEI, MA Hongying

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The influences of the roughness of fracture surface and the loading-unloading environment on seepage characteristics of fracture cannot be ignored. To study the influences of the fracture surface with different joint roughness coefficients (JRC) and loading-unloading of confining and osmotic pressures on the seepage evolution laws of rough single fracture of limestone, five groups of limestone samples with a single fracture with different JRCs are prepared. The self-developed seepage test system for the fractured rock mass is used to conduct a seepage test of the fractured samples with different JRCs under loading-unloading of confining and osmotic pressures. The results show that the seepage flow and permeability of different fractured samples decrease with the increase of the confining pressure, and the permeability of each sample has a power function relationship with the confining pressure, with the minimum  $R^2$  of 0.9583. There is an obvious hysteretic effect during the unloading of the confining pressure. The JRC has a great influence on the hysteretic degree during unloading, which is logarithmic with the decline and recovery. During the process of loading-unloading of pressure, the change of seepage flow through the single fracture is positively correlated with the osmotic pressure, while the permeability decreases continuously. There is a good correlation between the decreased value of seepage flow through the single fracture and the JRC after a cycle of loading-unloading of pressure. A prediction model for seepage flow of fracture after loading-unloading of osmotic pressure is proposed.

**Key words:** limestone; rough fracture; confining pressure; osmotic pressure; loading-unloading; seepage test

## 0 引言

石灰岩是地壳中分布最广的岩体之一, 广泛存在于中国水利和岩土工程中。水库蓄、放水、地下工程开挖等过程产生的加载、卸荷效应对裂隙岩体渗流的影响不容忽视<sup>[1-2]</sup>。因裂隙岩体渗流问题发生大坝失事案例不少<sup>[3]</sup>, 如法国Malpasset双曲拱坝、Vajoint拱坝及中国梅山连拱坝等<sup>[3]</sup>。研究加卸载作用下石灰岩粗

糙单裂隙渗流规律具有重要理论意义。

Snow等<sup>[4]</sup>通过光滑平行板裂隙渗流试验, 提出了

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52179130, 51609073); 江苏省自然科学基金项目 (BK20201312); 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心项目 (DFZX2020003)

收稿日期: 2022-07-22

\*通信作者 (E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn)

单裂隙渗流立方定律。据此,国内外学者<sup>[5-8]</sup>针对粗糙裂隙,提出了许多立方定律修正公式,但其大多没有考虑裂隙外部荷载变化的影响,描述加卸载作用下粗糙单裂隙渗流特性时存在局限。石灰岩裂隙岩体受地震、构造作用影响,易形成加卸载应力环境,加载、卸荷过程对岩体裂隙渗流影响有所不同。梁宁慧等<sup>[9]</sup>指出卸荷过程岩体裂隙渗透系数变化存在滞后性,验证了卸荷、加载过程裂隙渗透系数变化的差异性,提出了卸荷量与渗透系数的关系式。孙可明等<sup>[10]</sup>开展了不同粗糙裂隙岩体加卸载渗流试验,分析试验前后裂隙面形貌特征,揭示了粗糙裂隙渗流加载、卸荷作用下渗透率、平均宽度等参数变化规律。杨秀荣等<sup>[11]</sup>研究了渗流-应力耦合作用下石灰岩渗透破坏模式,揭示了破裂岩样渗透率随净围压、渗压加卸载变化规律。Tian等<sup>[12]</sup>等以细砂岩、砂岩和复合岩体为试验岩样,研究了裂隙水压力和围压对裂隙渗透系数的影响,表明裂隙渗透系数随裂隙水压、净围压增加,分别呈线性增加和指数下降的变化趋势。Zhao等<sup>[13]</sup>研究了3种不同裂隙石灰岩岩样在应力加载、卸荷环境下的裂隙渗流特性和形貌特征变化规律,提出了一种考虑裂隙面形貌特征和弹性变形影响的渗透率分析模型。Fu等<sup>[14]</sup>研究了围压作用下砂质泥岩粗糙裂隙渗透性变化规律,指出裂隙渗透系数受裂隙面粗糙度和围压共同影响,其中围压加载的影响最显著,二者呈指数函数关系。Zhang等<sup>[15]</sup>发现围压首次加卸载过程对裂隙岩体渗透率影响最显著,围压卸荷过程中,渗透率恢复存在滞后性。Chao等<sup>[16]</sup>基于围压循环加卸载条件下渗透试验成果,提出了裂隙渗透张量的数学计算模型。

综上研究表明,考虑裂隙面粗糙度、加卸载作用对岩体裂隙渗流特性的研究成果已有不少,但同时针对不同节理粗糙度裂隙面、研究围压和渗压加卸载作用下石灰岩单粗糙裂隙渗流规律的成果较少,多因素影响下裂隙渗流特性演化机理尚不清楚。鉴于此,选定5组不同JRC石灰岩裂隙试样,开展围压、渗压加卸载条件下石灰岩单裂隙试样渗流试验,揭示围压、渗压加卸载过程中粗糙单裂隙渗流特性演化规律。

## 1 JRC 和渗透率计算

裂隙面粗糙程度对裂隙岩体渗流特性影响显著,研究粗糙裂隙渗流特性时,需先明确裂隙面形貌特征表征形式<sup>[17-19]</sup>。挪威学者Barton<sup>[5]</sup>于1973年提出了节理粗糙度系数JRC的概念。Barton等<sup>[20]</sup>通过136个岩样剪切试验,绘制了10条标准轮廓曲线,明确了JRC取值范围为0~20,提出了基于10条标准轮廓曲线的JRC计算方法,受到国际岩石力学学会的认可。诸多学者<sup>[21-24]</sup>

结合先进测量技术和方法,从维度、表征参数和计算公式等方面进行裂隙粗糙程度表征,其中Tse<sup>[21]</sup>提出的JRC计算公式应用广泛。Blelem等<sup>[22]</sup>提出平均梯度模的 $Z_{2s}$ 概念。王珂等<sup>[25]</sup>将Tse公式的表征维度提升至三维,本文采用该方法<sup>[25]</sup>进行JRC计算,具体公式如下:

$$Z_{2s} = \left\{ \left[ \frac{1}{\Delta x^2} \sum_{i=1}^{N_x-1} \sum_{j=1}^{N_y-1} \frac{(z_{i+1, j+1} - z_{i, j+1})^2 + (z_{i+1, j} - z_{i, j})^2}{2} + \frac{1}{\Delta y^2} \sum_{j=1}^{N_y-1} \sum_{i=1}^{N_x-1} \frac{(z_{i+1, j+1} - z_{i+1, j})^2 + (z_{i, j+1} - z_{i, j})^2}{2} \right] / [(N_x - 1)(N_y - 1)] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$JRC = 32.2 + 32.47 \lg Z_{2s} \quad (2)$$

式中:  $Z_{2s}$  为平均梯度模;  $N_x$ ,  $N_y$  分别为  $X$  轴,  $Y$  轴方向上采样点的数量;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  分别为  $X$  轴,  $Y$  轴方向上采样点的间隔;  $Z_i$ ,  $Z_{i+1}$  分别为第  $i$  和第  $i+1$  裂隙离散点的  $Z$  轴方向坐标,  $i$ ,  $j$  分别为沿  $X$  轴和  $Y$  轴方向上细观平面的序号。

由于岩体基质渗透性远小于裂隙,裂隙岩体渗透性主要由裂隙渗透率决定。本文采取立方定律反算裂隙渗透率<sup>[26]</sup>,计算公式具体如下:

$$Q = Av = AKJ = Db_h \frac{gb_h^2}{12v} \frac{\Delta P}{\rho g L} = \frac{Db_h^3 \Delta P}{12\mu L} \quad (3)$$

$$b_h = \sqrt[3]{\frac{12\mu L Q}{D \Delta P}} \quad (4)$$

$$k = K \frac{\mu}{\gamma} = \frac{gb_h^2}{12v} \frac{\rho v}{\rho g} = \frac{b_h^2}{12} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为通过裂隙面的渗流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A$  为裂隙面的横断面面积 ( $\text{m}^2$ );  $v$  为通过裂隙面流体的流速 ( $\text{m/s}$ );  $K$  为裂隙面的渗透系数 ( $\text{m/s}$ );  $D$  为裂隙试样的直径 ( $\text{m}$ );  $b_h$  为裂隙的等效水力隙宽 ( $\text{m}$ );  $\Delta P$  为裂隙试样的两端压差 ( $\text{Pa}$ );  $\rho$  为水流的密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $L$  为裂隙试样的长度 ( $\text{m}$ );  $\mu$  为水流的动力黏滞系数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $k$  为石灰岩裂隙面的渗透率 ( $\text{m}^2$ );  $\gamma$  为水流的重度 ( $\text{N/m}^3$ )。

## 2 试验概况

### 2.1 试样制备

石灰岩试样取自济宁嘉祥纸坊镇矿山,质地较密,其基本物理性质如表1所示。采取水钻法在完整岩块上钻取直径50 mm,高100 mm的圆柱体试样。采用微机控制电液伺服万能试验机(WAW-1000)劈裂圆柱体试样<sup>[27]</sup>,设定不同的加载速率获取20组不同JRC劈裂试样,通过南京Wiiboox公司提供的Reeyee 3M三维光学扫描仪采集裂隙表面几何特征,将扫描数据导入自

主编写的JRC计算程序中计算,选取5个典型JRC裂隙面试样进行渗流试验,典型JRC裂隙面单侧壁面数字化图像如图1所示。

表1 石灰岩物理性质

Table 1 Physical properties of limestone

物理量	计量单位	平均值
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.70
吸水率	%	0.21
抗压强度	MPa	87.50
抗拉强度	MPa	8.20
抗弯强度	MPa	9.11

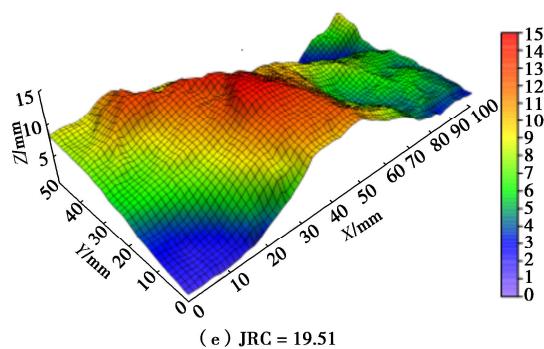
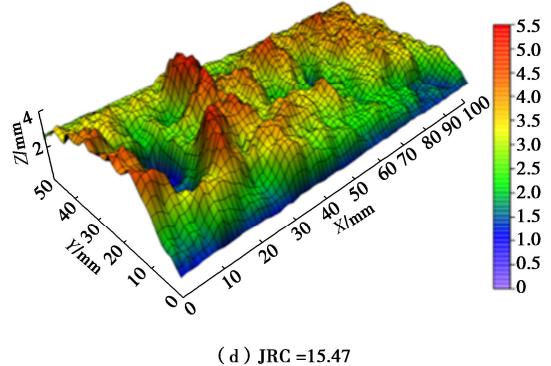
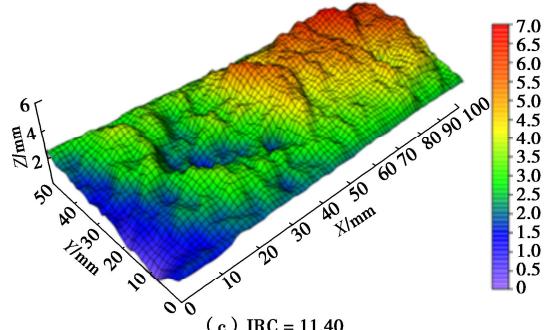
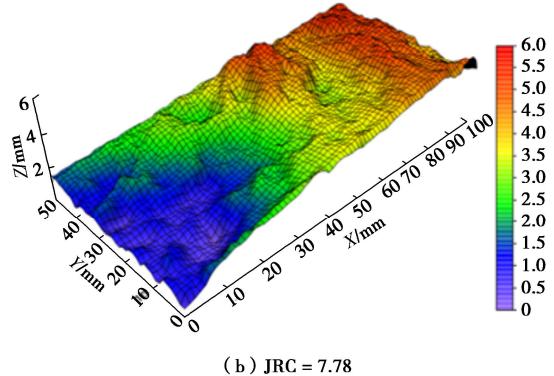
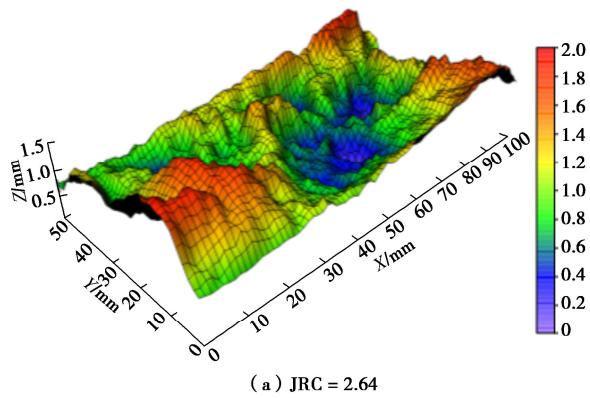


图1 不同 JRC 的裂隙面数字化图像

Fig. 1 Digital images of fracture surfaces with different JRCs

为保证围压和渗压加卸载试验中试样裂隙面 JRC 统一,以劈裂岩样裂隙面为模板,采用激光雕刻技术复刻形貌特征与之相同的裂隙岩样。试样雕刻步骤如下:①对5个不同JRC裂隙岩样劈裂面进行扫描,获得坐标点云数据;②将数据导入岩石雕刻设备所依托的维宏软件重构劈裂面模型;③依据重构模型,对石灰岩进行雕刻;④将雕刻好的两半裂隙面对齐拼接,钻芯取样。将雕刻所得两半岩样贴紧,涂抹704硅胶密封侧壁,以避免试验过程中发生侧壁渗漏,图2为经过劈裂、雕刻、胶装处理后的试样形态图。

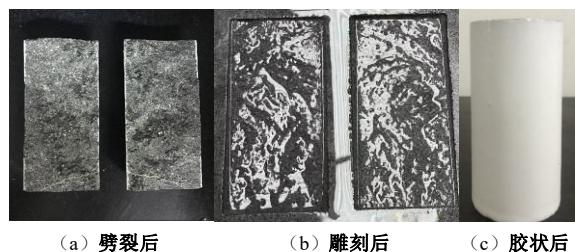


图2 制备阶段的试样形态图

Fig. 2 Shapes of samples during preparation process

## 2.2 试验装置

渗流试验采用自主研制的岩体裂隙渗流试验装置,包括轴向、围压和渗压加卸载装置,流量、轴压、围压和渗压数据采集系统等,试验系统主要装置见图3。



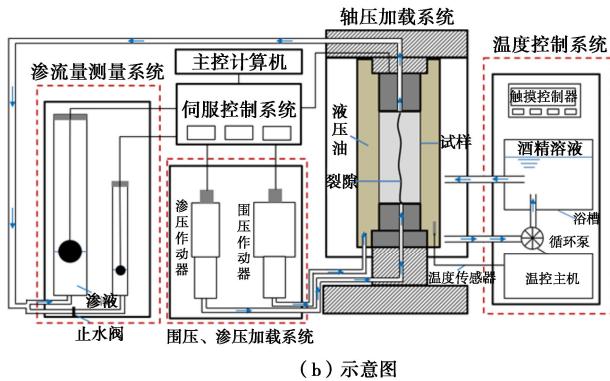


图3 试验系统主要装置图

Fig. 3 Diagram of main device of test system

### 2.3 试验过程和方案

选取不同 JRC (2.64, 7.78, 11.40, 15.47, 19.51) 石灰岩单裂隙试样进行渗流试验, 试验步骤如下: ① 将试样放置于压力室上、下压头中间, 施加轴压固定; ② 烘紧热缩膜密封试样表面及上、下压头接触部分; ③ 升高保温仓密封压力室, 打开排气阀, 待仓内满油后关闭; ④ 打开温控系统, 维持舱内温度恒定; ⑤ 预加围压 2.0 MPa 后, 施加渗压, 转应力控制模式维持稳定, 完成试验前准备工作。操作过程中施加初始轴压 5.0 MPa 固定试样, 保持稳定, 开展各工况渗透试验时, 轴向采用位移伺服控制模式, 轴压随围压与渗压协调变化, 保持轴压等于净围压。

围压和渗压加卸载过程分为 10 级, 以围压加卸载试验为例, 试验开始前设置围压为 2 MPa, 启动试验, 保持 2 MPa 围压 2 h 后以 0.005 MPa/s 速率加压至下一级, 继续保持 2 h, 依次类推, 直至增加至 10 MPa 后以相同速率卸压, 降至 2 MPa 后保持 2 h, 记录各级压力下的数据后结束试验。渗压加卸载过程与围压相同, 起始压力为 0.2 MPa, 加载速率为 0.001 MPa, 最大渗透压设置为 1.5 MPa。分级加卸载试验方案见表 2。

表2 不同加卸载条件下渗流试验方案

Table 2 Schemes of seepage test under different loading and unloading conditions

试样 编号	JRC	围压/ MPa	渗压/ MPa	加载速率/ (MPa·s <sup>-1</sup> )
M-1	2.64			
M-2	7.78	2, 3, 4, 6,		
M-3	11.40	8, 10, 8,	0.5	0.005
M-4	15.47	6, 4, 3, 2		
M-5	19.51			
H-1	2.64		0.2, 0.5, 0.8,	
H-2	7.78		1.0, 1.2, 1.5,	
H-3	11.40	3	1.2, 1.0, 0.8,	0.001
H-4	15.47		0.5, 0.2	
H-5	19.51			

## 3 结果分析

### 3.1 围压加卸载作用的影响

图 4 为石灰岩裂隙渗流量随围压加卸载变化曲线。

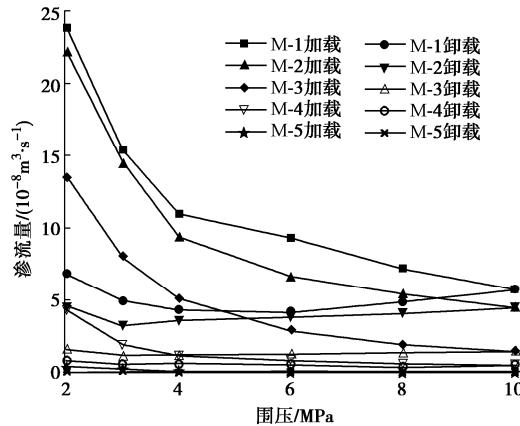


图4 渗流量随围压变化曲线

Fig. 4 Curves of seepage flow with confining pressure

由图 4 可知, 不同 JRC 裂隙渗流量随围压增大逐渐下降, 下降率逐渐减小并趋于稳定, JRC 越小, 初始渗流量越大, 下降量越大。低围压条件下, 裂隙平均开度较大, 裂隙面接触面积较小, 渗流量大; 围压加载至 4.0 MPa 时, 岩样 M-1~M-5 渗流量显著下降, 下降量占总下降量比值相近, 最小为 70.01%。这是由于侧向围压作用下, 试样裂隙被压密, 隙宽减小, 裂隙左、右粗糙面接触点局部应力增大, 超过岩体强度而发生变形, 转为面接触或相互嵌入, 接触面积增大, 对流面积减小, 渗流量下降; 随着围压加大, 渗流量持续下降, 但下降量明显减少, 这是因为裂隙面变化已趋于稳定, 裂隙接触面应力不均匀性减小, 隙宽和对流面积已达到下降阈值。

围压卸载过程中, 不同 JRC 裂隙渗流量变化呈现先减小后增大的趋势, 渗流量回升存在滞后性<sup>[9]</sup>; 围压降至 2.0 MPa 时, 渗流量和试验初始值存在较大差距, 说明在围压作用下, 岩样裂隙变化规律符合弹塑性变形理论<sup>[13]</sup>。卸荷过程中, 裂隙隙宽在水压力作用下有所增大, 接触面变形恢复, 但存在不可逆转的塑性损伤, 导致相同围压下裂隙渗透性较之加载时显著下降。围压加卸载过程, 裂隙面 JRC 越大, 相同围压下渗流量越小, 这是由于 JRC 越大, 裂隙面凹凸起伏度越大, 凹凸体数量偏多, 渗液在裂隙内流动路径延长, 导致渗流量减小<sup>[27]</sup>。

从裂隙渗流演化机理上分析, 在发展期, 压力作用下裂隙面凸起会嵌入另一面, 接触面增大, 隙宽减

少, 过流通道减小; 此外, 裂隙内破碎颗粒增多, 阻碍了水流在裂隙内流动。因此, 初期渗流量下降最为迅速。围压徐变作用下, 裂隙宽持续减小, 左、右裂隙面贴合更紧密。进入过渡期, 裂隙左、右裂隙面由点接触变为面接触, 凹凸体破损和变形过程减缓, 移动颗粒因间隙变小被逐渐固定, 渗流量下降趋势减缓。当裂隙面接触面积达到一定程度, 裂隙面之间的反作用力将平衡围压施加的作用力, 此时裂隙面凹凸体变形和隙宽稳定, 渗流量不再下降, 裂隙渗流进入稳定期。在整个裂隙渗流过程中, 同时期裂隙面 JRC 越小, 渗流量越大, 这是因为过流面积和路径在裂隙渗流中起主要作用。JRC 越小, 裂隙面凹凸体数量越少, 凹凸体接触面积越小, 渗液在裂隙面过流路径越短, 过流面积较大。因此, 围压作用下, JRC 越小的裂隙, 其渗流量随时间不断减小, 但其值仍高于同时期 JRC 大的裂隙。

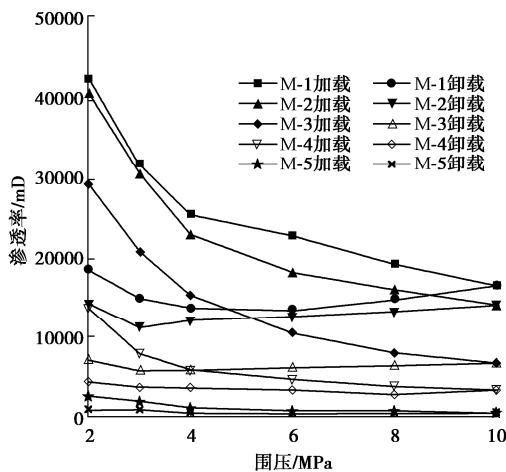


图 5 渗透率与围压变化曲线

Fig. 5 Curves of permeability and confining pressure

依据式 (3) ~ (5) 计算裂隙渗透率, 绘制裂隙渗透率随围压加载卸载的变化曲线, 如图 5 所示。结合图 4, 5 可知, 裂隙渗透率变化规律与渗流量一致。相同试样及试验条件下, 单位时间内裂隙渗流量与  $k^{3/2}$  成正比, 故在后续试验结果分析中, 选取渗透率  $k$  进行详细陈述。

为定量分析围压加载过程裂隙渗透率的变化规律, 对岩样 M-1~M-5 各级围压渗透率进行拟合, 拟合关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 围压加载过程中, 裂隙渗透率和围压呈良好的幂函数关系, 不同 JRC 岩样裂隙渗透率拟合公式的  $R^2$  最小为 0.9583, 拟合公式如下:

$$k = aP_a^b \quad (6)$$

式中:  $P_a$  为围压 (MPa);  $a$ ,  $b$  为与 JRC 相关的试验

参数。

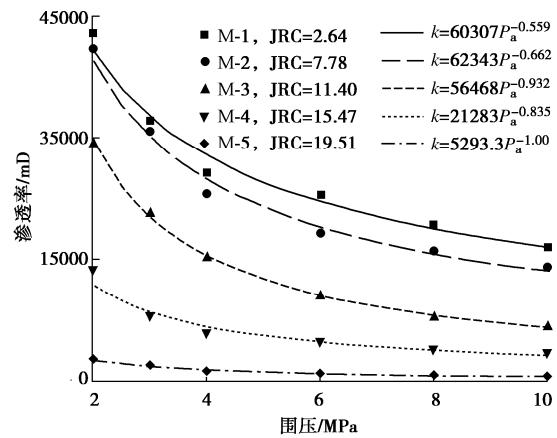


图 6 渗透率与围压  $P_a$  的拟合关系曲线

Fig. 6 Fitting curves between permeability and confining pressure

选取不同 JRC 岩样对  $a$ ,  $b$  参数值进行回归分析, 拟合曲线如图 7 所示, 拟合公式如下:

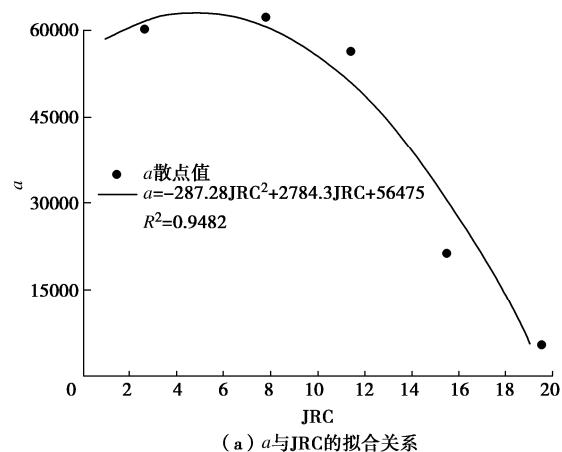
$$a = -287.28JRC^2 + 2784.3JRC + 56475 \quad (7)$$

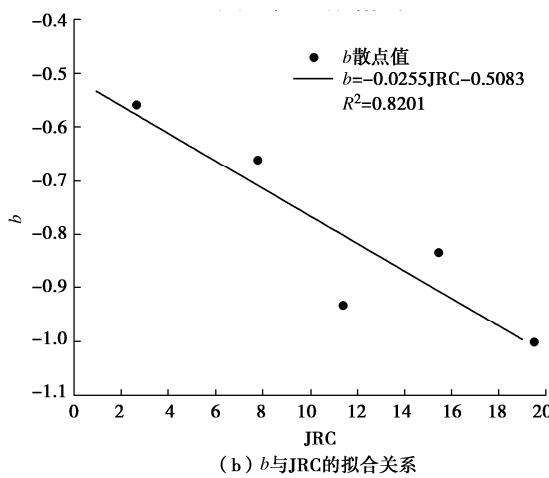
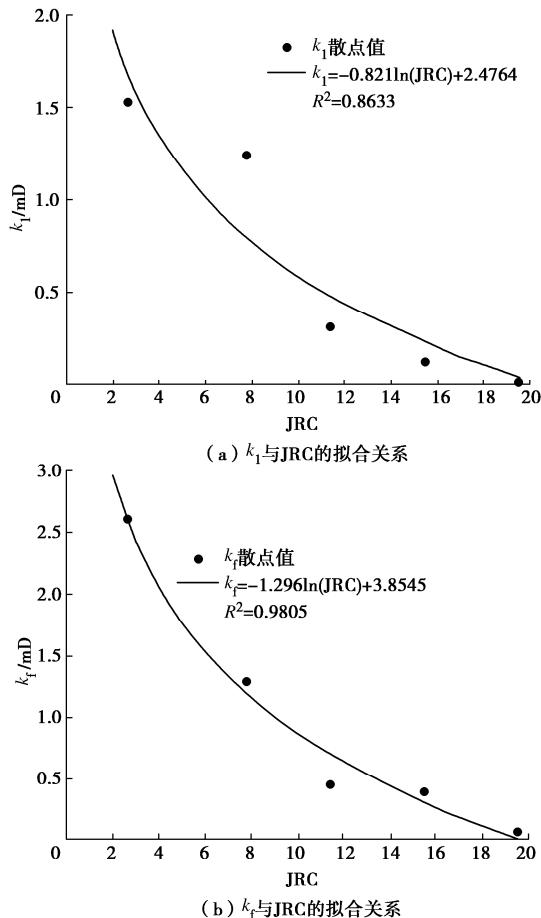
$$b = -0.0255JRC - 0.5083 \quad (8)$$

围压卸荷过程裂隙渗透率与围压不存在明显相关性。卸荷过程裂隙渗透率变化存在明显的滞回效应, 围压减小初期, 裂隙渗透率维持稳定或轻微下降, 当围压卸载到一定阈值后, 渗透率开始回升。不同 JRC 裂隙渗透率卸荷过程的滞后程度不同, JRC 越极端, 滞后程度越小, 围压阈值越大。如岩样 M-1 渗透率回升阈值为 8.0 MPa, 岩样 M-3 围压阈值仅为 3.0 MPa, 为直观分析 JRC 对卸荷过程裂隙渗透率滞回效应的影响, 提取滞回阶段裂隙渗透率下降量  $k_l$  和回升量  $k_f$ ,  $k_l$  和  $k_f$  随 JRC 的拟合关系曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 滞回阶段裂隙渗透率下降量和回升量随 JRC 增大而减小, 在 2.0~19.0 的 JRC 范围内,  $k_l$  和  $k_f$  与 JRC 的拟合公式  $R^2$  分别为 0.8633 和 0.9805, 公式如下:

$$k_l = -0.8211\ln(JRC) + 2.4764 \quad (9)$$

$$k_f = -1.2960\ln(JRC) + 3.8545 \quad (10)$$



图 7 试验参数  $a$ ,  $b$  与 JRC 的拟合关系曲线Fig. 7 Fitting curves of test parameters  $a$ ,  $b$  and JRC图 8  $k_1$  和  $k_f$  随 JRC 变化的关系曲线Fig. 8 Curves of  $k_1$  and  $k_f$  with JRC

综上所述, JRC 对卸荷过程裂隙渗透率的影响主要体现在滞回阶段渗透率下降回升程度及回升的围压阈值; JRC 越大, 渗透率下降和回升程度越明显。

### 3.2 渗压加卸载作用的影响

图 9 为不同 JRC 裂隙渗流量随渗透压加卸载的变化曲线。由图 9 可知, 不同 JRC 岩样裂隙的初始渗流

量接近, 最大差值为  $0.98 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ , 裂隙面 JRC 与渗流量之间不存在明显对应关系; 渗压加卸载与围压加卸载渗透试验初期渗流量与 JRC 之间的相关性受裂隙面净围压影响较大。由表 2 可知, 渗压加卸载条件下的渗透试验初始净围压值为 2.8 MPa, 远大于围压加卸载条件下的 1.5 MPa; 净围压增大导致裂隙隙宽减小, 裂隙壁面贴合更紧密, 渗流量下降。此时不同 JRC 裂隙面渗流量均处于较低水平, JRC 对渗流量影响不明显。渗流量随渗透压增大而上升, 在 0.2 MPa 至 0.8 MPa 加载阶段, 各岩样裂隙渗流量上升较为显著, 增长量占整体增量的 69.65%~78.99%, 此外, 相同渗透压下裂隙渗流量随 JRC 增大而减小, 其规律可与围压加卸载试验结果相互佐证, 说明在 0.5 MPa 至 1.5 MPa 渗压和 2.0 MPa 至 10.0 MPa 围压变化范围内, 裂隙渗流量与 JRC 负相关。

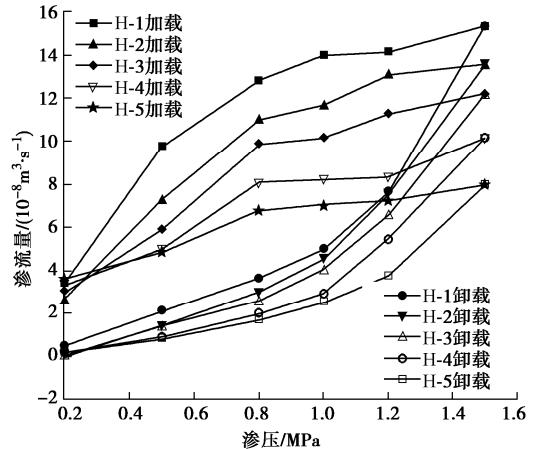


图 9 裂隙渗流量随渗透压加卸载变化曲线

Fig. 9 Curves of seepage flow of fracture with loading and unloading of seepage pressure

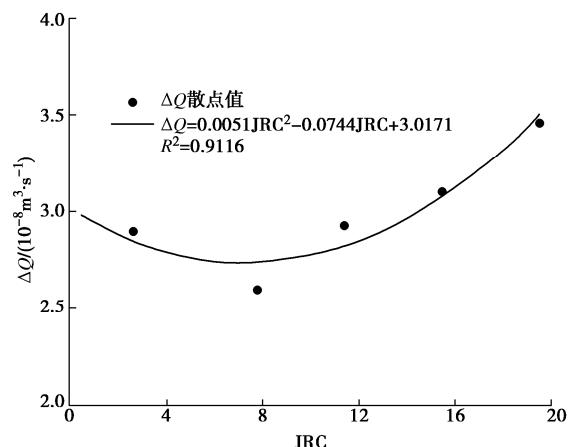


图 10 JRC 与渗流量下降量拟合关系

Fig. 10 Fitting relationship between JRC and decrease of seepage discharge

渗压卸荷过程, 渗流量逐渐减小, 待降至初始值

0.2 MPa 时, 岩样 H-1~H-5 裂隙渗流量相近, 最大差值为  $0.46 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ , 差值较小; 与初始值相比, 各岩样裂隙渗流量下降了  $2.60 \times 10^{-8} \sim 3.10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ , 降幅较大。为研究初次渗压加卸载后裂隙渗流量与 JRC 的变化关系, 绘制渗流量下降量  $\Delta Q$  随 JRC 变化关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知,  $\Delta Q$  随 JRC 增大呈现先下降后增大的变化趋势, 建立二次函数拟合关系, 其  $R^2$  为 0.9116, 具体公式如下:

$$\Delta Q = 0.0051\text{JRC}^2 + 0.0744\text{JRC} + 3.0171 \quad (11)$$

初始渗流量  $Q_0$  和裂隙面 JRC 也呈二次函数关系, 拟合结果见图 11 所示, 其  $R^2$  为 0.813, 具体公式如下:

$$Q_0 = 0.0091\text{JRC}^2 - 0.1773\text{JRC} + 3.7578 \quad (12)$$

将监测所得初始渗流量代入式 (12) 反算裂隙 JRC, 再将 JRC 代入式 (11), 即可得到 0.2~1.6 MPa 范围内渗压加卸载后裂隙  $\Delta Q$ 。

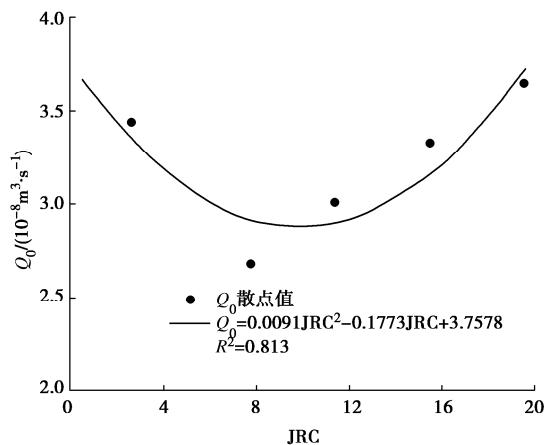


图 11 JRC 与初始渗流量的拟合关系

Fig. 11 Fitting relationship between JRC and initial seepage rate

为直观分析渗压加卸载过程裂隙岩体渗透性变化规律, 绘制裂隙渗透率随渗压加卸载的变化曲线图 12。由图 12 可知, 渗压加载过程, 不同 JRC 裂隙渗透率逐渐降低, 与图 9 呈现的渗流量变化趋势相反, 在 3.0 MPa 围压和 0.2~1.6 MPa 渗压范围内, 随着渗压加载, 裂隙内水压力增大, 渗透水流速增大, 冲蚀作用增强, 裂隙面岩体强度下降, 在围压挤压和渗透水冲蚀作用下, 裂隙内壁薄弱处会发生二次破坏<sup>[27]</sup>; 此外, 碳酸钙等矿物质易溶解于渗液而析出, 渗流速度增大会促进析出过程, 凹凸体数量及起伏度增加, 渗流路径延长、左右壁面接触面积增大; 因此在应力、冲蚀和溶解等作用影响下, 渗流量随渗压增加而增大的程度被削弱, 裂隙等效水力隙宽和渗透率呈下降趋势。

结合式 (3)~(5) 可进一步印证渗透率变化规律, 渗压加载过程中, 渗流量  $Q$  增加 (图 9), 但其增

幅小于渗透压力差  $\Delta P$  的增幅, 故  $Q/\Delta P$  比值呈下降趋势; 裂隙渗透率与  $Q/\Delta P$  正相关, 故渗压加载过程中, 裂隙渗透率亦呈下降趋势。在 0.2~0.5 MPa 的渗压加载初期, JRC 越大, 渗透率下降越显著, 渗透率大小与 JRC 相关性不显著; 在 0.5~1.5 MPa 的渗压加载中后期, 不同 JRC 裂隙渗透率下降率波动较大, 相同渗压下, 裂隙渗透率随 JRC 增大而减小。渗压卸荷过程, 不同 JRC 裂隙渗透率变化趋势与渗流量相似, 呈下降趋势; 说明裂隙内水压力对水力隙宽减小存在延缓作用, 故随着渗压减小, 裂隙内水压力下降, 隙宽减小, 裂隙渗透率逐级下降。综上可知, 在 3.0 MPa 围压和 0.2~1.6 MPa 渗压加卸载过程中, 渗压变化对裂隙面渗透率主要起削减作用。

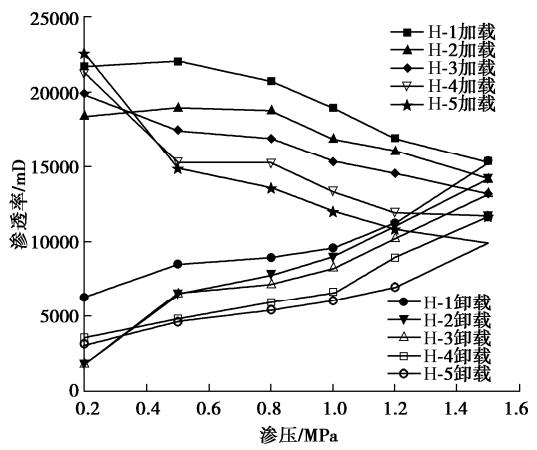


图 12 裂隙渗透率随渗压加卸载变化曲线

Fig. 12 Curves of fracture permeability with seepage pressure under loading and unloading conditions

### 3.3 形貌特征分析

围压和渗压加卸载过程中, 作用于裂隙面上的应力作用和冲蚀作用均会影响裂隙面形貌特征。图 13 是 JRC 值为 11.40 的裂隙面渗透试验前后形貌特征对比图, 其中左图为裂隙面实物图, 右图是其凸起高程分布图 (以裂隙面最低点为基准参考面)。

由图 13 可知, 裂隙表面存在因凹凸体嵌入产生的深色点状印记, 对比试验前后裂隙面形貌特征可知, 渗流试验后点状印记数量显著增多, 相较于试验前, 分布更加均匀, 说明围压作用下, 壁面贴合更加紧密, 壁面接触面积增大, 相互挤压的凹凸体数量增多、嵌入程度增加; 历经围压加卸载或渗压加卸载的渗透试验后, 裂隙表面凸起高度均减小, 前者降幅较大, 说明作用于裂隙壁面的法向应力和渗流作用对裂隙面 JRC 起削弱作用, 但随着试验前裂隙面 JRC 减小, 削弱效果逐渐下降, 当裂隙面 JRC 为 2.64 时, 出现增强效果, 其原因为裂隙中流动的偏中性水溶液对裂隙表面矿物质溶解作用强度较低。JRC 较大时, 裂隙表面

凹凸起伏程度大, 凹凸体数量偏多, 此时应力和渗流冲蚀产生的削弱作用占据主导; 而 JRC 较小时, 裂隙表面整体趋于平滑, 此时溶解作用对裂隙面凹凸体数量及起伏程度的增强作用占据主导, 试验后 JRC 有所增加。

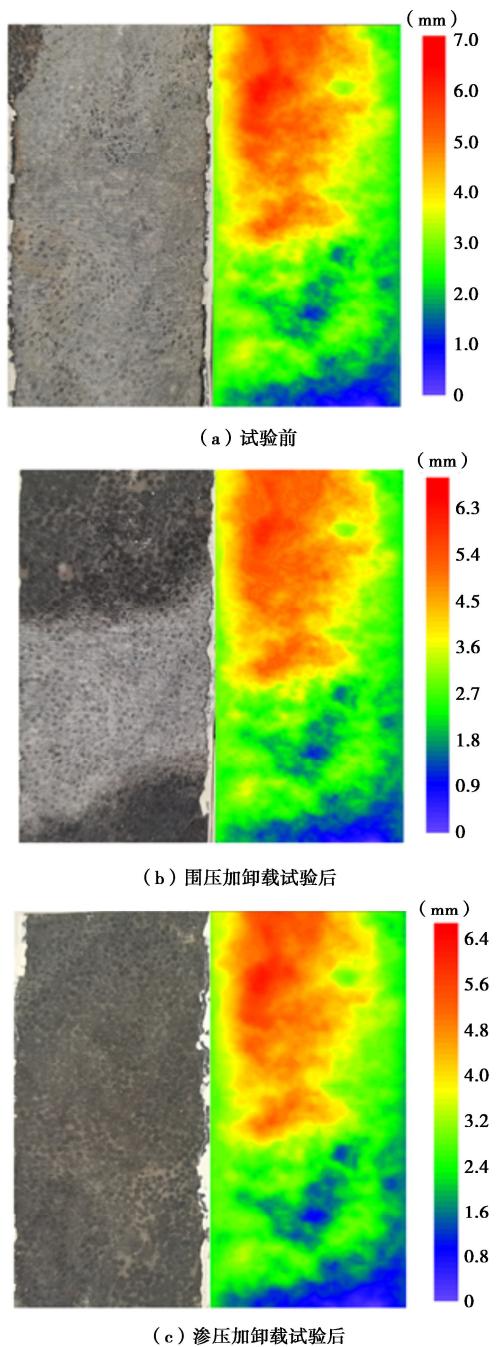


图 13 试验前后试样裂隙 (JRC = 11.40) 形貌特征图

Fig. 13 Characteristics of morphologies of fracture surface of samples with JRC of 11.40 before and after tests

## 4 讨 论

围压加载过程, 不同 JRC 裂隙渗流量和渗透率均与围压呈负相关, 卸荷过程存在滞回阶段, 其程度与

JRC 相关, 相同围压下, JRC 越大, 渗流量和渗透率越大; 裂隙渗流量和渗透率随围压变化趋势与孙可明等<sup>[10]</sup>研究成果基本一致, 但由于试验岩样不同, 孙可明等<sup>[10]</sup>试验得出的渗透率和流量在法向荷载卸荷过程中未明显下降。渗压加卸载过程中, 不同 JRC 裂隙渗流量与渗压正相关, 渗透率则呈持续降低趋势。在 3.0 MPa 围压和 0.2~1.6 MPa 渗压作用下, 渗压增大对石灰岩裂隙渗透率的影响以削弱为主。低渗压 (0.2~0.5 MPa) 下裂隙渗流量、渗透率与 JRC 相关性不强。本文渗压加卸载试验成果仅适用于单一贯通裂隙或断层的渗流分析, 当石灰岩破裂, 裂隙发展成网状分布时, 这一变化规律适用性下降<sup>[11]</sup>。围压或渗压初次加卸载完成后, 裂隙渗流量和渗透率均有所降低, 说明围压和渗压加卸载过程会导致裂隙粗糙面形貌特征发生不可扭转的塑性变形。

为避免岩体内部裂隙网络, 尤其是贯穿裂隙或断层造成基岩发生大面积渗漏, 在大坝选址前的地质勘探过程中, 宜对易发生大面积渗漏的裂隙或断层进行渗流量监测和应力分析, 获得其初始围压与渗流量。通过式 (3)~(8) 反算裂隙初始 JRC, 结合该区域裂隙岩体渗透率设计标准, 可估算围压增量; 结合式 (9), (10) 可估算 50 m 水头下 2.0~10.0 MPa 范围内围压首次加卸载作用对岩体裂隙渗透率的削减程度。联立式 (11), (12), 基于当前渗流量监测值, 估算对应位置裂隙面 JRC, 并推算历经单次 0.2~1.6 MPa 幅度渗压加卸载作用后的裂隙渗流量, 在监测点故障时可作为补充数据; 此外, 通过对比分析与实际监测数据差异, 可提前预知相关裂隙所处渗压环境变化。

由于实际工程中, 岩体裂隙的应力环境极为复杂, 围压、渗压等变化幅度及频率随机性大, 天然裂隙或断层的倾角和尺寸与实验室样品存在较大差异, 将本文提出的经验公式用于首次加卸载后渗流参数预测计算时, 应结合现场压水试验成果对经验公式进行修正。且本文试验围压比渗压至少大 1.5 MPa, 试验成果未能体现渗压加载接近围压或超过围压后的粗糙裂隙渗流特性, 也未考虑轴压、岩性、裂隙开度、充填物、温度和渗透介质酸碱性等诸多因素对裂隙渗流规律的影响。故本文提出的裂隙渗流量及渗透率计算公式在多因素交叉影响下的适用性有待进一步论证。

## 5 结 论

(1) 石灰岩裂隙渗流量和渗透率随围压增大而增大; 围压加载时不同 JRC 裂隙渗透率均与围压呈幂函数关系,  $R^2$  最小值为 0.9583; 围压卸荷阶段裂隙渗透

率变化呈现先下降后回升的滞回效应; 不同 JRC 裂隙渗透率与围压无明确的定量关系。

(2) 石灰岩裂隙渗流量和渗透率随渗压加载、卸荷的变化趋势存在差异, 裂隙渗流量变化与渗压正相关, 渗透率呈下降趋势; 初始渗流量及渗压加载、卸荷后渗流量下降量与裂隙 JRC 均呈二次函数关系。

(3) 2.0~10 MPa 围压加卸载范围内, JRC 越小, 渗流量和渗透率越大; 围压卸荷时渗透率下降量和回升量均与 JRC 相关, JRC 越大, 卸荷时渗透率滞回效应越明显。在 0.5~1.5 MPa 范围内的渗压加卸载作用下, JRC 越大, 渗流量和渗透率越大; 渗压降至 0.5 MPa 以下, 渗流量和渗透率与 JRC 无明显相关性。

(4) 本文提出了一种围压加卸载作用下粗糙裂隙渗透率估算模型及渗压加卸载作用下渗流量预测模型, 建立了裂隙渗透率与 JRC、围压和渗压等参数之间的定量关系, 研究成果可为加卸载环境下岩体裂隙渗透参数和渗漏量估算提供理论依据。

## 参考文献:

- [1] 张英, 李鹏, 郭奇峰, 等. 水力耦合裂隙岩体变形破坏机制研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 21-41. (ZHANG Ying, LI Peng, GUO Qifeng, et al. Research progress of deformation and failure mechanism in fractured rock mass under hydromechanical coupling[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 21-41. (in Chinese))
- [2] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 421-425. (XIAO Ming. Three-dimensional numerical model of construction process for underground opening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 421-425. (in Chinese))
- [3] 郭保华, 程坦, 陈岩, 等. 大理岩裂隙渗流特性及充填砂土影响[J]. 水力学报, 2019, 50(4): 463-474. (GUO Baohua, CHENG Tan, CHEN Yan, et al. Seepage characteristic of marble fracture and effect of filling sands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(4): 463-474. (in Chinese))
- [4] SNOW D T. Anisotropic permeability of fractured media[J]. Water Resources Research, 1969, 5(6): 1273-1289.
- [5] BARTON N, BANDIS S, BAKHTAR K. Strength deformation and conductivity coupling of rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1985, 22(3): 121-140.
- [6] 周创兵, 叶自桐, 韩冰. 岩石节理面形态与水力特性研究 [J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 233-239. (ZHOU Chuangbing, YE Zitong, HAN Bing. A study on configuration and hydraulic conductivity of rock joints[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(3): 233-239. (in Chinese))
- [7] WANG L C, CARDENAS, BAYANI M, et al. Modification of the local cubic law of fracture flow for weak inertia, tortuosity, and roughness[J]. Water Resource Research, 2015, 51(4): 2064-2080.
- [8] GAN L, CHEN G Y, SHEN Z Z, et al. Modification method of seepage parameters for rough fractures based on digital image technique[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 209, 109967.
- [9] 梁宁慧, 刘新荣, 艾万民, 等. 裂隙岩体卸荷渗透规律试验研究 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 88-92. (LIANG Ninghui, LIU Xinrong, AI Wanming, et al. Experiment study on the permeability of fractured rock under unloading[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(1): 88-92. (in Chinese))
- [10] 孙可明, 辛利伟, 翟诚, 等. 考虑三维形貌特征粗糙裂隙加卸载渗流规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 161-166. (SUN Keming, XIN Liwei, ZHAI Cheng, et al. Seepage law of rough fracture during loading-unloading process considering 3D topography characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 161-166. (in Chinese))
- [11] 杨秀荣, 姜谙男, 张峰瑞, 等. 破裂石灰岩在渗透压-应力耦合作用下渗流特性研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(增刊 1): 101-109. (YANG Xiurong, JIANG Annan, ZHANG Fengrui, et al. Seepage characteristics of fractured limestone under osmotic pressure-stress coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 101-109. (in Chinese))
- [12] TIAN Z X, ZHANG W S, DAI C Q. Permeability model analysis of combined rock mass with different lithology[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 12(24): 1-13.
- [13] ZHAO Y, WANG C L, BI J. Analysis of fractured rock permeability evolution under unloading conditions by the model of elastoplastic contact between rough surfaces[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(12): 5795-5808.
- [14] FU H Y, JIANG H B, QIU X, et al. Seepage characteristics of a fractured silty mudstone under different confining pressures and temperatures[J]. Energy Science and Engineering, 2020, 27(7): 1907-1916.
- [15] ZHANG X B, XIA Z H, YAO C, et al. Experimental study on seepage properties of postpeak fractured rocks under cyclic

- loading-unloading confining stress and axial stress[J]. *Geofluids*, 2021, **2021**(120):1-12.
- [16] CHAO Z M, MA G T, WANG M. The investigation of seepage model for columnar jointed rock masses during cyclic loading and unloading of confining pressure[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, **13**(14): 1-12.
- [17] ZHANG Y, CHAI J. Effect of surface morphology on fluid flow in rough fractures: a review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, **79**(6): 103343.
- [18] 覃 源, 张 鑫, 柴军瑞, 等. 模拟不同节理粗糙度对单裂隙渗流的影响[J]. *应用力学学报*, 2020, **37**(1): 455-462. (QIN Yuan, ZHANG Xin, CHAI Junrui, et al. Simulation of the influence of different joint roughness on single fracture seepage[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, **37**(1): 455-462. (in Chinese))
- [19] 甘 磊, 马洪影, 沈振中. 下凹形态裂隙面粗糙程度表征及立方定律修正系数拟合[J]. *水利学报*, 2021, **52**(4): 420-431. (GAN Lei, MA Hongying, SHEN Zhenzhong. Roughness characterization of concave fracture surface and coefficient fitting of modified cubic law[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(4): 420-431. (in Chinese))
- [20] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. *Rock Mechanics*, 1977, **10**(1): 1-54.
- [21] TSE R. Estimating joint roughness coefficients[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, **16**(5): 303-307.
- [22] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, **33**(4): 217-242.
- [23] LI Y, ZHANG Y. Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, **77**: 27-35.
- [24] ZHANG Z, HUAN J, LI N, et al. Suggested new statistical parameter for estimating joint roughness coefficient considering the shear direction[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021: 1-16.
- [25] 王 珂, 盛金昌, 郭会彩, 等. 应力-渗流侵蚀耦合作用下粗糙裂隙渗流特性研究[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(增刊 1): 30-40. (WANG Ke, SHENG Jinchang, GAO Huicai, et al. Study on seepage characteristics of rough crack under coupling of stress-seepage erosion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(S1): 30-40. (in Chinese))
- [26] 贺玉龙, 陶玉敬, 杨立中. 不同节理粗糙度系数单裂隙渗流特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增刊 1): 3235-3240. (HE Yulong, TAO Yujing, YANG Lizhong. Experimental research on hydraulic behaviors in a single joint with various values of JRC[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S1): 3235-3240. (in Chinese))
- [27] 单裂隙渗流特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(6): 1629-1635. (YANG Jinbao, FENG Xiating, PAN Pengzhi. Experimental study of permeability characteristics of single rock fracture considering stress history[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(6): 1629-1635. (in Chinese))