

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221781

# 水—岩作用下白云岩单裂隙渗流特性演化规律试验研究

左小鹏<sup>a,b</sup>, 孙旭曙<sup>a,b</sup>, 郭晓萍<sup>a,b</sup>, 张 敏<sup>a,b</sup>, 冯兴礼<sup>a,b</sup>

(三峡大学 a. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室; b. 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为研究水—岩作用条件下水库消落带岩体渗流特性演化规律,以乌东德水电站库区白云岩为例,通过单裂隙渗流试验获取裂隙渗流特性变化规律,并借助 SEM 和三维表面轮廓扫描技术,研究了裂隙面微观结构和表面形貌变化规律,探讨了裂隙渗流特性演化规律及影响机理。结果表明,在水—岩作用过程中,当渗透水压恒定时,渗流量随围压的增大呈指数关系递减;当围压恒定时,渗流量随渗透水压的增加呈线性关系递增;随水—岩作用周期的增加,裂隙渗流量呈先快后慢的减小,随后缓慢增加并趋于稳定。水—岩作用使得裂隙面一定深度的矿物软化溶解,改变了微观孔隙结构和表面形貌特征,在围压作用下裂隙面闭合更加紧密,裂隙有效隙宽进一步减小是裂隙渗流量减小的主要原因。

**关键词:** 水—岩作用; 裂隙渗流; 微观结构; 形貌特征

**中图分类号:** TV139.1; TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0186-04

## 1 引言

天然岩体由结构面网络及其所围成的岩块组成<sup>[1]</sup>,连通的结构面是地下水流动的主要通道,也是水—岩作用的主要场所。水—岩作用使得岩体矿物软化溶解、结构面微观结构及裂隙面形貌特征改变,进而导致结构面力学性能劣化和裂隙渗流特性改变,裂隙渗流特性改变将进一步影响裂隙岩体的应力分布和稳定性。因此,邓华峰等<sup>[2]</sup>通过室内试验研究发现水—岩作用下岩体的物理力学参数劣化规律;BRUSH D J<sup>[3]</sup>发现水—岩作用过程中,裂隙表面矿物发生溶解和沉淀;段玲玲等<sup>[4]</sup>借助立方定律研究了水—岩作用下灰岩的渗流特性;屈建军等<sup>[5]</sup>通过数值模拟开展边坡岩体渗流场和应力场的耦合分析;盛金昌等<sup>[6]</sup>通过对立方定律的修正得到裂隙渗流的经验公式及多场耦合作用对裂隙岩体渗流特性的影响。上述研究结果为裂隙岩体渗流研究奠定了基础,但尚未揭示水—岩作用下裂隙岩体渗流特性演化规律。为此,本文以乌东德水电站库区消落带白云岩为例,通过单裂隙渗流试验获取裂隙渗流特性变化规律,并借助 SEM 和三维表面轮廓扫描技

术,综合分析了微观孔隙结构和裂隙面三维形貌变化规律,探讨了裂隙渗流特性演化规律及影响机理,获得了一些有益结论,可供借鉴。

## 2 试样制备及试验方案

### 2.1 试样制备

乌东德水电站库区震旦系上统灯影组(Z<sub>2</sub>d)白云岩岩样表面胶结致密无可见裂纹。根据《工程岩体试验方法标准》和试验设备对试样尺寸和平整度的要求,钻芯取样、切割磨平制备成直径50 mm×高度100 mm的圆柱形标准试样,其次通过RMT-150C试验机开展巴西劈裂试验制备单裂隙试样(图1),最后选取裂隙面完整的试样开展试验。

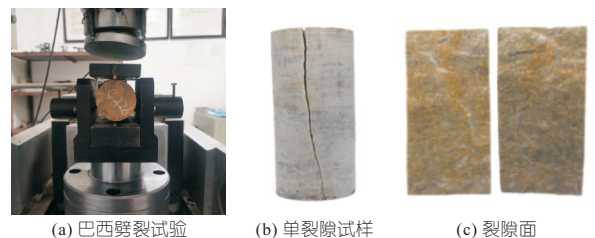


图1 单裂隙试样制作过程

Fig. 1 Single crack sample making process

收稿日期: 2022-08-29, 修回日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U2034203); 国家自然科学基金青年基金项目(52009067)

作者简介: 左小鹏(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工岩石力学, E-mail: 1355290284@qq.com

通讯作者: 孙旭曙(1981-), 男, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水工岩石力学, E-mail: sunxs@ctgu.edu.cn

## 2.2 试验方案

(1)水—岩作用试验方案。为模拟消落带岩体所赋存的酸性环境,采用硫酸、硫酸钠及蒸馏水配制了 pH 值为 6.5 的硫酸钠溶液<sup>[7]</sup>;同时为实现裂隙面酸性溶液流动的过程,设计了流动水流试验装置,通过小型水泵持续抽水经溢流堰后均匀的流过试样裂隙面,主要模拟裂隙面在溶液流动过程中的水—岩作用。试验共设置 12 个周期,每期试验为 20 d,分别在初始状态、1、3、5、8、12 周期扫描裂隙面微细观形貌,获取微细观结构特征变化规律。

(2)单裂隙渗流试验方案。单裂隙渗流试验采用自主研制的 HSY-4-2 单裂隙水岩耦合仪,该仪器可模拟长期高水头作用下单裂隙水岩耦合作用。试样在不同周期水—岩作用后依次开展单裂隙渗流试验,试验中设置 3 个围压(1、2、3 MPa)和 3 个渗透水压力(0.2、0.5、0.8 MPa),通过不同围压和渗透水压下裂隙渗流量分析单裂隙白云岩渗流特性演化规律。

## 3 单裂隙白云岩渗流特性分析

### 3.1 围压对单裂隙渗流特性的影响

不同周期条件下单裂隙白云岩渗流量统计见表 1,从表 1 中取第 3 期数据绘制渗流量与围压变化曲线见图 2。由图 2 可知,当渗透水压力恒定时,随围压的增加,单裂隙渗流量呈指数函数关系递减;当围压从 1 MPa 增至 3 MPa 时,渗流量减小了 41%~71%,0.5 MPa 渗透水压力作用下,渗流量随围压的增大变化最为明显。

表 1 流动水流作用下单裂隙白云岩渗流量统计表

Tab.1 Statistical table of single fractured dolomite seepage bypercolating water

围压 应力 /MPa	渗透水 压力 /MPa	不同试验周期下渗流量/(mL·s <sup>-1</sup> )					
		0	1	3	5	8	12
1	0.2	2.038	0.681	0.444	0.143	0.596	0.930
	0.5	5.014	1.699	1.027	0.356	1.329	2.258
	0.8	6.886	2.700	1.433	0.531	1.979	3.266
2	0.2	1.526	0.463	0.277	0.074	0.417	0.516
	0.5	3.425	1.185	0.719	0.202	0.962	1.393
	0.8	5.377	1.849	1.087	0.322	1.455	2.339
3	0.2	1.080	0.363	0.196	0.043	0.321	0.400
	0.5	2.535	0.855	0.473	0.102	0.732	0.903
	0.8	3.624	1.374	0.751	0.162	1.165	1.370

### 3.2 渗透水压力对单裂隙渗流特性的影响

从表 1 中取第 3 期数据绘制渗流量与渗透水压力的变化曲线见图 3。由图 3 可知,当围压恒定时,随渗透水压力的增加,单裂隙渗流量呈线性

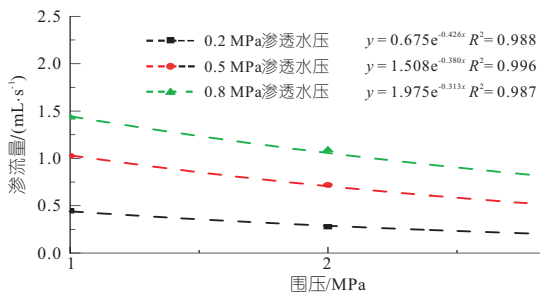


图 2 单裂隙白云岩渗流量与围压变化关系

Fig.2 Relationship between seepage flow and confining pressure of single fracture dolomite

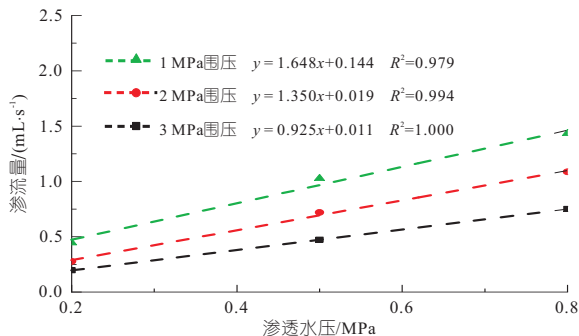


图 3 单裂隙白云岩渗流量与渗透水压变化关系

Fig.3 Relationship between seepage flow and seepage pressure of single fracture dolomite

关系增加;渗透水压力从 0.2 MPa 增至 0.8 MPa 时,单裂隙渗流量增加了 220%~350%,在 2 MPa 围压作用下,渗流量随渗透水压的增加变化最快。

### 3.3 水—岩作用试验周期对单裂隙渗流特性的影响

围压 3.0 MPa 作用下单裂隙渗流量与试验周期(表 1)的变化曲线见图 4。由图 4 可知,单裂隙渗流量随试验周期的增加呈先骤减再缓慢减小至最小值,再缓慢增加并趋于平稳状态的变化规律;与初始状态相比,渗流量在第 1、3、5、8、12 周期分别减小了 60.8%~65.6%、79.2%~79.8%、92.3%~95.5%、67.9%~72.9%、52.6%~62.2%。

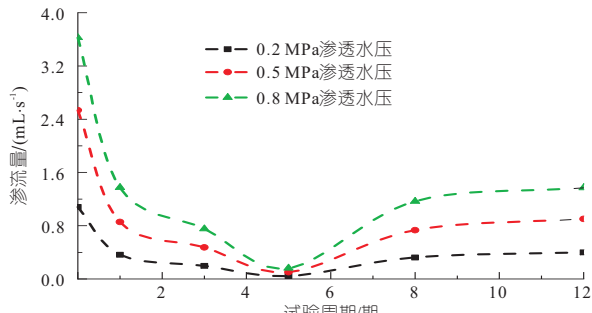


图 4 单裂隙白云岩渗流量与试验周期的变化关系 (围压为 3.0 MPa)

Fig.4 Relationship between seepage flow of single fracture dolomite and test period (confining pressure 3.0 MPa)

第 5 周期渗流量为最小值,第 8、12 周期渗流量相差较小。

## 4 讨论

### 4.1 岩样表面微细观孔隙结构演化规律

水—岩作用后岩样表面微细观结构变化显著,通过电镜扫描获取不同周期岩样表面微细观结构见图 5(图中放大倍数为 350 倍)。由图 5 可知:①初始状态,试样表面结构致密,无明显的裂纹和孔隙,白云石等矿物被胶结物包裹,结构相对完整。②第 1 周期,试样表面钙质胶结物溶解、脱落、表面出现凹陷且粗糙化。③第 3~5 周期,白云石和钙质胶结物进一步溶解脱落,颗粒间的胶结作用削弱,矿物之间微孔隙和微裂纹发育,表

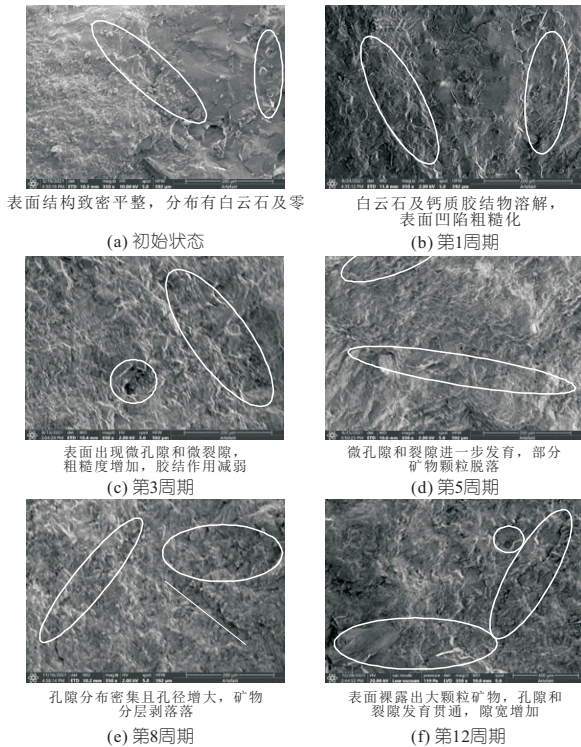


图 5 不同水—岩作用周期下白云岩表面微细观结构变化图

Fig. 5 Changes of surface microstructure of dolomite under different water rock interaction periods

面粗糙度增大。④第 8~12 周期,表面大颗粒矿物裸露,分层剥落,微孔隙分布密集且孔径增大,微裂隙发育贯通,表面结构疏松且形貌特征复杂化。在水—岩作用后,水溶液由透明变为土黄色浑浊液体。

### 4.2 裂隙面形貌特征演化规律

水—岩作用后白云岩裂隙面形貌特征显著变化,采用 ST500 三维非接触式表面轮廓仪获取不同周期裂隙面 3D 视图见图 6,3D 视图明显反映裂隙面尺寸大小和高度起伏情况(表面颜色越深表示高度越低,颜色越浅表示高度越高)。由图 6 可知,表面最大高度从 3.562 mm 增至 4.342 mm。为进一步分析表面形貌特征的演化规律,结合文献[3,8],统计分析裂隙面高度参数(均方根高度  $S_q$ 、最大高度  $S_z$ 、算术平均高度  $S_a$ )和混合参数(展开界面面积比  $S_{dr}$ )变化规律并绘制形貌参数变化曲线见图 7。其中, $S_q$  为裂隙面区域内各点高度的均方根,通常反映表面形貌的波动性和离散性; $S_z$  为裂隙面区域内最大峰高和最大谷深的和,反映裂隙面轮廓高度变化情况; $S_a$  为相对于平均面各点高度绝对值的平均值,通常反映裂隙面粗糙度; $S_{dr}$  为从正上方观察裂隙面测量区域时面积的增加量,反映了裂隙面复杂性。试验结果表明:①随着水—岩作用周期的增加,裂隙面高度参数呈“先快后慢”的增长趋势。与初始状态相比,第 1 周期后,均方根高度  $S_q$ 、最大高度  $S_z$ 、算术平均高度  $S_a$  分别增大了 3.85%、7.19%、4.02%;第 5 周期后,均方根高度  $S_q$ 、最大高度  $S_z$ 、算术平均高度  $S_a$  分别增大了 12.88%、17.80%、12.39%;第 12 周期后,均方根高度  $S_q$ 、最大高度  $S_z$ 、算术平均高度  $S_a$  分别增大了 19.39%、21.89%、18.85%。②随着水—岩作用周期的增加,裂隙面混合参数展开界面面积比  $S_{dr}$  呈“先快后慢”的增长趋势。与初始状态相比, $S_{dr}$  在第 1、3、5、8、12 周期分别增大了 12.12%、19.87%、30.72%、35.19%、36.36%。

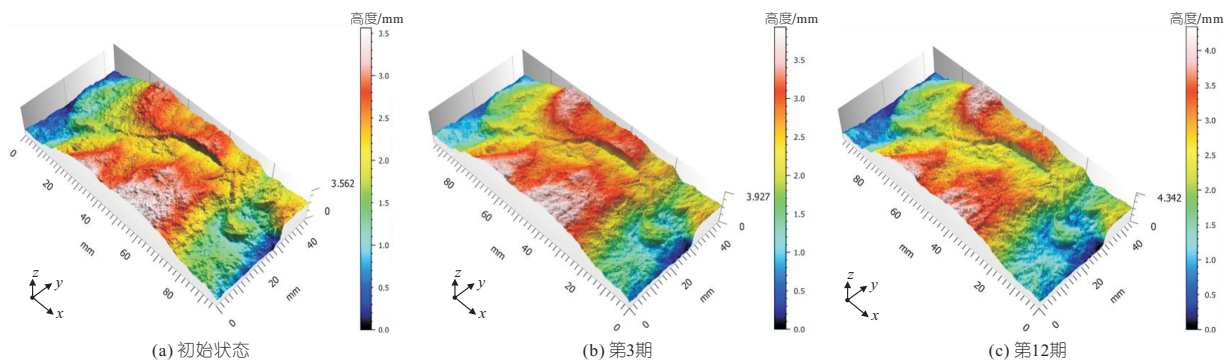


图 6 流动水流作用白云岩裂隙面 3D 视图

Fig. 6 3D view of dolomite fracture surface underpercolating water

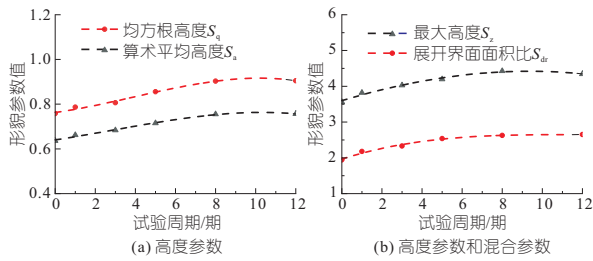


图 7 流动水流作用下白云岩裂隙面形貌参数变化曲线

Fig. 7 Change curve of morphological parameters of dolomite fracture surface under percolating water

综上可知,水—岩作用后裂隙面矿物溶解、孔隙和裂隙发育贯通,表面局部区域侵蚀脱落,由最小二乘面所确定的基准面降低,表面轮廓高度、粗糙度、波动性和离散性增大并趋于稳定,表面结构疏松且形貌特征由简单向复杂多样化过渡。

综合分析水—岩作用前后单裂隙渗流、微细观结构及裂隙面形貌特征演化规律可知,试样在初始状态下,裂隙表面平整致密、结构完整,随着水—岩作用周期增加,裂隙面表层一定深度的矿物软化溶解,甚至脱落,微孔隙和裂隙逐步发育。在围压作用下两裂隙面相互挤压产生法向变形,使得裂隙面表面微孔隙和微裂隙减小甚至闭合,裂隙面有效接触面积增加,裂隙张开度减小,渗流量随之减小;随着水—岩作用周期继续增加,表面形貌特征由简单向复杂多样化过渡,形成了稳定的渗流通道,渗流量缓慢增加并趋于稳定。水—岩作用过程中白云岩微细观结构和形貌特征演化规律反映了水—岩作用的方向和程度。

## 5 结论

### Experimental Study on Seepage Characteristics Evolution of Dolomite Single Fracture Under Water-Rock Interaction

ZUO Xiao-peng<sup>a,b</sup>, SUN Xu-shu<sup>a,b</sup>, GUO Xiao-ping<sup>a,b</sup>, ZHANG Min<sup>a,b</sup>, FENG Xing-li<sup>a,b</sup>

(a. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education;

b. College of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to study the seepage characteristics evolution of rock mass in the water level-fluctuating zone under condition of water-rock interaction, the dolomite in the reservoir area of Wudongde Hydropower Station was selected as the research object in this paper. The variation law of fracture seepage characteristics was obtained through the single fracture seepage test. With the help of SEM and 3D surface contour scanning technology, the variation law of fracture surface microstructure and surface morphological characteristics was studied, and the influence mechanism of fracture seepage characteristics evolution law was discussed. The results show that in the process of water-rock interaction, when the seepage pressure is constant, the seepage decreases exponentially with the increase of confining pressure; When the confining pressure is constant, the seepage increases linearly with the increase of seepage pressure; With the increase of water-rock interaction period, the seepage of fractures decreases rapidly at first and then slowly, and then increases slowly and tends to be stable. The water-rock interaction softens and dissolves the minerals at a certain depth of the fracture surface, and changes the micropore structure and surface morphological characteristics. Under action of confining pressure, the fracture surface is more closed. The further reduction of effective crack width is the main reason for the decrease of fracture seepage.

**Key words:** water-rock interaction; fracture seepage; microstructure; morphological characteristics

a. 当渗透水压恒定时,渗流量随围压的增大呈指数关系递减;当围压恒定时,渗流量随渗透水压的增加呈线性关系递增;随水—岩作用周期的增加,裂隙渗流量呈先快后慢的减小,随后缓慢增加并趋于稳定。

b. 水—岩作用使裂隙面一定深度的矿物软化溶解,改变了微细观孔隙结构和表面形貌特征,在围压作用下裂隙面闭合更加紧密,裂隙有效隙宽进一步减小,是裂隙渗流量减小的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] 邓华锋,李建林,王孔伟,等. 库岸边坡水-岩作用[M]. 北京:科学出版社. 2016.
- [3] BRUSH D J. Three-dimensional fluid flow and solute transport in rough-walled fracture[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2002.
- [4] 段玲玲,邓华锋,齐豫,等. 水-岩作用下单裂隙灰岩渗流特性演化规律研究[J]. 岩土力学,2020,41(11):3671-3679,3768.
- [5] 屈建军,李建林,刘杰,等. 考虑地下水作用的渗流场与应力场耦合分析[J]. 水电能源科学,2010,28(1):50-53.
- [6] 盛金昌,吴彦青,白柯含,等. 应力和侵蚀性溶液渗透耦合作用下碳酸盐岩渗透特性试验研究[J]. 水电能源科学,2019,37(1):111-114.
- [7] 柴少波,宋浪,刘欢,等. 酸性干湿循环下充填节理岩石劣化性能试验研究[J]. 岩土力学,2022,43(11):2993-3002.
- [8] 黄叶宁. 水岩作用下灰岩溶解机理及表面形貌演化研究[D]. 宜昌:三峡大学,2019.