

长时浸泡红砂岩加/卸荷条件下的剪切特性及细观损伤机理

孙钱程, 徐 晓, 丰光亮, 周炳昊, 赵凯冰

Shear characteristics and mesoscopic damage mechanism of long time soaking red sandstone under loading and unloading conditions

SUN Qiancheng, XU Xiao, FENG Guangliang, ZHOU Binghao, and ZHAO Kaibing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

颗粒形状对粗粒土剪切变形影响的细观研究

A meso-scale study of the influence of particle shape on shear deformation of coarse-grained soil

魏捷, 魏玉峰, 黄鑫 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 114-122

泸定大渡河桥冰碛土的结构及现场剪切试验研究

Soil structure and in-site shear test of moraine soil near the Xingkang Bridge over the Daduhe River in Luding

程强, 郭喜峰 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 126-133

单轴压缩下红色砷砂岩水泥土的能量演化机制研究

Energy evolution mechanism of red Pisha-sandstone cement soil under uniaxial compression

耿凯强, 李晓丽 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 134-141

初始固结应力对平面应变黄土剪切破坏特性影响

Effect of initial solidification stress on shear failure characteristics of loess under the plane strain condition

李宝平, 杨倩, 张玉, 平高权, 王智 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 92-99

红层砂岩高温后蠕变试验研究

Creep tests of red-bed sandstone after high temperature

李畅, 任光明, 孟陆波, 代晗, 张晓东, 李科 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 71-71

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202303055

孙钱程, 徐晓, 丰光亮, 等. 长时浸泡红砂岩加/卸荷条件下的剪切特性及细观损伤机理 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 77-89.

SUN Qiancheng, XU Xiao, FENG Guangliang, et al. Shear characteristics and mesoscopic damage mechanism of long time soaking red sandstone under loading and unloading conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 77-89.

长时浸泡红砂岩加/卸荷条件下的剪切特性及 细观损伤机理

孙钱程¹, 徐 晓¹, 丰光亮^{1,2}, 周炳昊¹, 赵凯冰¹

(1. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 三峡库区防洪限制水位(145 m)以下岸坡岩体在库水升降过程中经历了长期浸泡作用, 并且水位变化导致岩体受到切向加载剪切和法向卸荷剪切 2 种工况作用, 而岩石剪切特性的差异直接影响岸坡在不同水库运营阶段的稳定性。文章以典型长石石英砂岩为研究对象, 开展了不同浸泡天数下砂岩试样的切向加载、法向卸荷剪切试验, 得到了 2 种受力条件下砂岩剪切特性的变化规律, 并结合溶液测试、SEM 测试、核磁共振试验揭示了不同工况下岩石剪切特性产生差异的细观机理。研究表明: (1) 与初始试样相比, 经过 80 d 的浸泡后, 该类试样的黏聚力损失要大于内摩擦角的损失, 切向加载剪切所得黏聚力降低了 40.5%, 内摩擦角最终仅降低了 2%, 而法向卸荷剪切所得黏聚力降低了 31%, 内摩擦角最终降低了 8%; (2) 试样经历长期浸泡导致胶结物矿物被溶解、溶蚀, 次生孔隙逐步发育并贯通, 孔隙度增大, 经过 60 d 浸泡后, 试样的含水率、孔隙度、孔隙结构基本达到稳定状态, 克服剪切作用的颗粒骨架几乎不再受浸泡水的影响, 这是长期饱水试样剪切性质逐渐弱化并趋于平稳的原因; (3) 法向卸荷剪切条件下, 剪切主裂纹面与理论剪切面之间偏差增大, 破裂面更倾向于形成“S 型”和“M 型”, 实际剪切面的增大变相提高了岩石的抗剪强度, 而对岩石抗剪强度贡献最大的是骨架颗粒, 故岩石内摩擦角更大, 而提供黏聚力的充填胶结物质在张剪破坏中的贡献小, 所以法向卸荷中岩石的黏聚力更低。研究成果可为库区涉水边坡在水位升降中的稳定性评价以及考虑实际工况进行参数取值的试验方法选择提供参考。

关键词: 砂岩; 剪切特性; 切向加载; 法向卸荷; 细观机理; 库岸边坡; 三峡库区

中图分类号: TU458^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0077-13

Shear characteristics and mesoscopic damage mechanism of long time soaking red sandstone under loading and unloading conditions

SUN Qiancheng¹, XU Xiao¹, FENG Guangliang^{1,2}, ZHOU Binghao¹, ZHAO Kaibing¹

(1. National Field Observation and Research Station of Landsides in Three Gorges of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-07-11

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909136; 41972295); 土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范项目(2021EJD026)

第一作者: 孙钱程(1988—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事岩土工程相关的教学及研究工作。E-mail: qc_sun@ctgu.edu.cn

通讯作者: 丰光亮(1987—), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事微震/声发射监测、岩土工程围岩稳定性分析、预警及控制方面的研究工作。E-mail: glfeng@whrsm.ac.cn

Abstract: The bank slope rock mass below the flood control restricted water level (145 m) in the Three Gorges Reservoir area has experienced long-term immersion in the process of reservoir water lifting and lowering; the water level changes lead to the rock mass being subjected to two working conditions, tangential loading shearing and normal unloading shearing. The difference in rock shearing characteristics directly affects the stability evaluation of bank slopes in different reservoir operation stages. Tangential loading and normal unloading shear tests were carried out on the typical feldspar quartz sandstone after different soaking days; then the characteristics changes of sandstone shear under the two stress conditions were obtained. The microscopic mechanism of the differences was revealed by solution test, SEM test, and nuclear magnetic resonance test. The results show that: (1) compared with the initial sample, after soaking for 80 days, the cohesion loss of the sample is greater than the loss of internal friction angle. The cohesion of the sample under tangential loading is reduced by 40.5%, and the internal friction Angle is only reduced by 2%, while the cohesion of the sample under normal unloading shear is reduced by 31%, and the internal friction Angle is reduced by 8%. (2) The long-term immersion of the sample results in the dissolution of the cement minerals, the gradual development and penetration of the secondary pores, and the increase of porosity. After 60 days of immersion, basically, the water content, porosity, and pore structure of the sample reach a stable state; the particle skeleton overcoming the shear action is almost no longer affected by the soaking water. This is the reason why the shear properties of the samples with long-term water saturation gradually weaken and become stable. (3) Under normal unloading shear conditions, the deviation between the main crack surface and the theoretical shear surface increases; the fracture surface is more inclined to form “S” and “M” types. The increase of the actual shear plane increases the peak shear stress that the rock can bear. Because the biggest contribution to the rock is the skeleton particle, the internal friction angle is larger, and the filling cementing material that provides cohesion makes less contribution to the tensile shear failure. The cohesion obtained by normal unloading is also lower. This study can provide basic information for the stability evaluation of wading slope in reservoir area with the fluctuation of water level and the selection of test method considering the actual working conditions.

Keywords: sandstone; shear characteristic; tangential loading; normal unloading; meso-mechanism; bank slope; Three Gorges Reservoir

在荷载作用下岩体裂隙贯通直至破坏是边坡工程中常见的破坏模式,开展适当条件的室内试验,获取岩体的物理力学参数,并分析岩体在近似受力条件下的变形特点与变形模式,是目前岩石力学重要的研究手段,可以为实际工程提供参考依据。

剪切破坏是库区岩质滑坡最主要的破坏形式之一。剪出口附近的岩体长期处于水淹状态,其剪切性能直接受到库水长期浸泡的影响,针对水对岩石剪切特性研究的成果较多,重点考虑了含水率、溶液性质、岩石矿物、岩石节理等影响因素^[1-4];郑东普等^[5]开展了不同含水状态下白云岩的直剪试验,发现岩石黏聚力及内摩擦角随含水率的增加而降低;常五岳^[6]分析了不同含水率下易崩解砂岩的剪切特性,发现试样黏聚力随含水率的增加逐渐减小,而内摩擦角逐渐增大的规律;李鹏等^[7]对经过不同性质溶液浸泡的砂岩试样进行了直剪试验,分析了水化学溶液对岩石抗

剪强度的影响,发现在酸/碱性环境条件下,随着溶液酸/碱性增强及反应时间延长,砂岩黏聚力、内摩擦角值呈递减趋势;周罕等^[8]对不同含水状态下的黏土岩和粉砂岩进行了直剪试验,发现岩石因矿物成分的差异,水岩作用后抗剪强度参数的变化也存在差异;赵志宏^[9]分析了水对单裂隙岩体抗剪强度参数的影响,发现单裂隙水-岩力学作用的本质是空腔内水压可承担部分法向应力,物理作用的机制是对基本摩擦角以及接触凸起体强度的降低;邓华锋等^[10]分析了水作用下砂岩抗剪强度参数的劣化与节理倾角间的关系,发现水岩作用不仅使得岩石力学性质劣化,而且也会改变其变形破坏模式;王艳磊等^[11]、陈小川等^[12]、周翠英等^[13]、Nouailletas 等^[14]通过测试岩石孔隙、矿物成分、节理起伏度,发现岩石细观结构的演化会影响其宏观剪切强度。

三峡工程自 2003 年蓄水以来,先后发生了大量的

滑坡灾害,尤其是 2008 年蓄水至 175 m 以后,库岸边坡在水位 145~175 m 之间经历 30 m 的周期性升降,而在 145 m 水位以下经历着长期浸泡。现场调查表明,三峡库区湖北段 1 183 处地质灾害点中,911 处为滑坡,超过 20% 的滑坡剪出口位于防洪限制水位 145 m 以下,如赵树岭滑坡^[15]、范家坪滑坡^[15]、千将坪滑坡^[15]、卡子湾滑坡^[15]、木鱼包滑坡^[16]、石榴树包滑坡^[17]、杉树槽滑坡^[18]、龙王庙古滑坡^[19]等。

145 m 水位以下岩石除了经历长期浸泡,在水位升降过程中还经历不同程度的加/卸荷作用。当水位上升时,潜在剪切面上下的岩体承受的法向荷载与切向荷载都增大,其中法向荷载不超过岩石的单(三)轴强度时,切向加载工况不利于岸坡的稳定性;当水位下降时,潜在剪切面上下的岩体承受的法向荷载与切向荷载都减小,在切向荷载不超过岩石的剪切强度时,法向卸荷工况更不利于岸坡的稳定性。已有研究表明,不同加载方式获得的土的抗剪强度存在着差异性^[20],根据岩土体的实际受力路径,进行对应的室内试验获取强度参数十分重要^[21]。

目前的研究成果强调了库水位周期作用引起的干湿循环效应对岩石力学参数折减的影响,但长期饱水状态下岩石经历不同的加/卸载条件,其力学行为的差异以及对岩石力学参数的影响仍然是需要进一步探讨的问题。鉴于此,本文以典型的长石石英砂岩试样为研究对象,考虑饱水作用时间影响,开展不同加/卸荷条件下的剪切试验,分析切向加载剪切与法向卸荷剪切下岩石剪切强度、破坏模式的差异性,揭示其影响岩石剪切特性的细观机理,为库区边坡的稳定性分析提供理论基础。

1 试验方案

1.1 试样制备及筛选

经鉴定,岩样为细中粒长石石英砂岩,按体积占比从大到小主要成分分别为石英(65%)、长石(10%)、岩屑(5%)和填隙物(20%),胶结类型为孔隙式胶结。填隙物中碳酸盐岩矿物以胶结物形式存在,其体积占比约为 5%~10%;黏土矿物以填隙状分布,含量约为 5%;不透明矿物散状分布,含量小于 5%。其中主要化合物质量占比如表 1 所示,其中 Mg、K、Ca、Na 元素占比分别为 1.46%、1.29%、4.89%、1.01%。

依据国际岩石力学标准,将砂岩样品制成直径 50 mm、高 100 mm 的标准圆柱体样品(图 1),对制备完成的样品进行波速测试和孔隙度测试,遴选纵波波速

表 1 化合物质量占比

Table 1 Compound mass ratio

名称	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	其他
质量占比/%	1.36	2.44	8.43	55.10	1.56	6.85	24.26

2 000 m/s±100 m/s,初始孔隙度 6%±1% 的岩石试样为试验样品,以降低样品自身结构差异对试验规律的影响。



图 1 标准砂岩试样(部分)

Fig. 1 Standard sandstone sample (part)

1.2 岩样预处理

为避免溶液中原有离子的影响,岩样在去离子水中进行不同周期的浸泡试验,其预处理过程为:

(1)将砂岩试样放入烘箱中,烘干至相邻 2 次称量之差不超过后一次称量的 0.1%,放入干燥器冷却至室温,得到干燥砂岩试样。

(2)将干燥砂岩试样放入真空饱和仪中,试样真空饱水至相邻 2 次称量之差不超过后一次称量的 0.1%,得到砂岩饱水试样。

(3)将饱水砂岩试样分为 6 组,第 1 组作为初始饱水试样直接进行两种剪切试验,第 2—6 组放入去离子水溶液(超纯水仪)中分别浸泡 10, 20, 40, 60, 80 d 后取出,进行 2 种剪切试验。

(4)每段浸泡周期完成后抽取浸泡溶液进行成分测试,并测量试样的孔隙度、质量以及浸泡溶液的电导率、pH 值。

1.3 剪切试验

剪切试验在 YZW-1 000 型微机控制电动直剪仪上进行,试验温度为常温,该测试机可以自动记录试验过程中法向及切向的位移、荷载。

切向加载剪切试验包括 2 个步骤,如图 2(a)所示。

(1)以力-时间的控制模式,按 0.5 kN/min 的速率施加荷载,直到法向应力(σ)至设定值 σ_0 。

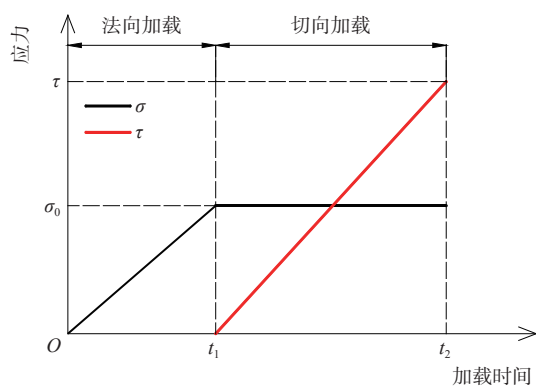
(2)保持法向荷载恒定,以位移-时间控制模式,按 0.1 mm/min 的速率施加荷载至试样破坏,结束剪切试验。

法向卸荷剪切试验包括 3 个步骤,如图 2(b)所示。

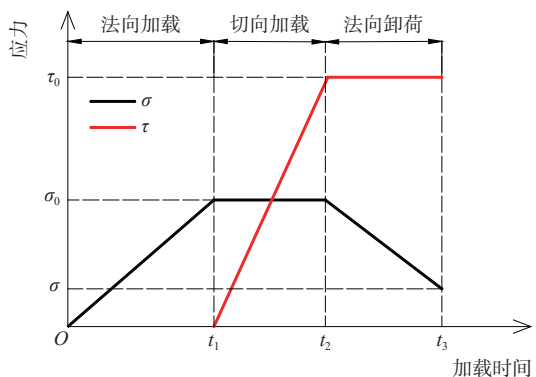
(1)以力-时间的控制模式,以 0.5 kN/min 的速率施加法向荷载至设定值 σ_0 。

(2)保持法向荷载恒定,以力-时间控制模式,以 0.1 kN/min 的速率施加荷载,直到切向应力(τ)至设定值 τ_0 。

(3)保持切向荷载恒定,以力-时间控制模式,以 0.02 kN/min 的速率卸载法向荷载,直到试验破坏,结束试验。



(a) 切向加载剪切加载路径



(b) 法向卸荷剪切加载路径

图 2 加载路径

Fig. 2 Loading path

其中,法向荷载设定值 σ_0 如果过大,则试样在施加切向荷载之前就会破坏。法向卸荷试验中,切向荷载设定值 τ_0 如果过大则试样在法向荷载卸载前就会破坏;若切向荷载设定值 τ_0 过小,则可能法向荷载卸载至 0 时,试样仍不会发生破坏。因此,还需要在试验开始前获得样品的单轴压缩强度和不同法向力下的剪切强度,根据试验结果设计试样加载方案,最终加载方案见表 2。

2 试验结果及分析

2.1 不同加/卸荷条件下砂岩的剪切特性

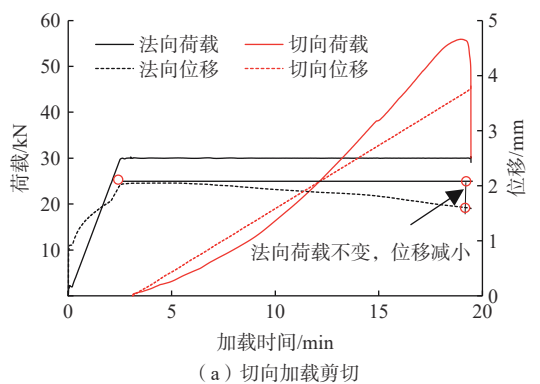
典型试样经历切向加载剪切的荷载/位移-时间曲

表 2 加载方案设置

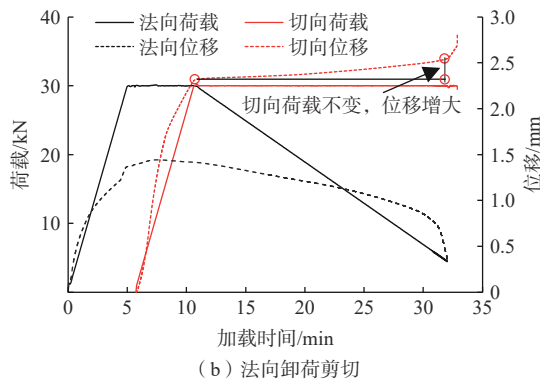
Table 2 Load scheme setup

试验分组	加载目标值		
	第1步 法向加载/kN	第2步 切向加载/kN	第3步 法向卸荷/kN
A组(切向加载直剪)	10, 15, 20, 25, 30	切向加载至破坏	无
B组(法向卸荷直剪)	30	30, 35, 40, 45	法向卸荷至破坏

线如图 3(a)所示,试验第 1 阶段施加法向荷载,法向荷载随时间线性增加至设定值 30 kN 后维持不变,然后施加切向荷载直至试样破坏。在此过程中,试样受切向荷载作用发生了小幅度的剪胀,导致法向位移回弹,但试样仍然属于脆性破坏。



(a) 切向加载剪切



(b) 法向卸荷剪切

图 3 剪切试验过程中荷载/位移-时间曲线

Fig. 3 Load/displacement-time curve during shear test

典型试样经历法向卸荷剪切的荷载/位移-时间曲线如图 3(b)所示,试验第 1 阶段施加法向荷载,法向荷载随时间线性增加至设定值 30 kN 后不变;然后施加切向荷载,切向荷载随时间线性增加至设定值 30 kN 维持恒定;在保持切向荷载恒定的条件下开始卸载法向荷载直至试样破坏。在此过程中,试样受切向荷载作用发生小幅度的蠕变,导致切向位移的增加。

分别对不同浸泡时间的试样进行切向加载剪切试验,相同法向荷载下试样荷载-位移曲线如图 4 所

示。不同浸泡时间砂岩荷载-位移曲线形态总体一致, 由初始压密阶段、线弹性变形阶段、塑性变形阶段、破坏阶段组成。在相同加载条件下, 随着浸泡时间的增加, 试样压密阶段逐渐增长, 试样达到峰值切向荷载时的切向位移逐渐增加, 砂岩试样的脆性特征逐渐减弱, 延性特征越发明显, 如图 4(a)所示。不同法向荷载条件下的荷载-位移曲线表明, 随着法向荷载的增加, 试样的峰值强度提升, 但浸泡时间对试样脆性特征的影响减弱, 如图 4(b)所示。

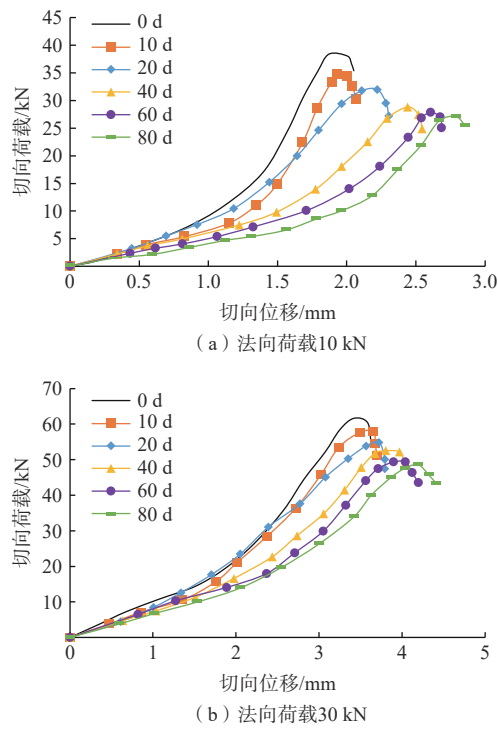


图 4 切向加载位移-荷载曲线
Fig. 4 Tangential loading displacement-load curve

分别对不同浸泡时间的试样进行法向卸荷剪切试验, 相同切向荷载下试样法向卸荷位移-荷载曲线如图 5 所示。经历不同浸泡时间砂岩卸荷阶段的荷载-位移曲线形态总体一致, 由线弹性变形阶段、加速变形阶段组成。卸载方案相同时, 随浸泡时间的增加, 试样卸载相同的法向荷载所产生的法向位移回弹值增大, 试样法向卸载至破坏时的位移减小, 如图 5(a)所示。对比切向荷载 30, 45 kN 条件下荷载-位移曲线可以发现, 当切向荷载较大时, 试样的法向位移回弹特征受浸泡时间的影响更明显, 见图 5(b)。

依据岩石试验规程^[22]的相关要求, 提取不同浸泡天数后剪切试验中砂岩试样破坏时法向荷载对应的切向荷载, 分别按式(1)、式(2)计算作用于剪切面上的法向应力和切向应力, 进行线性拟合, 获得不同浸

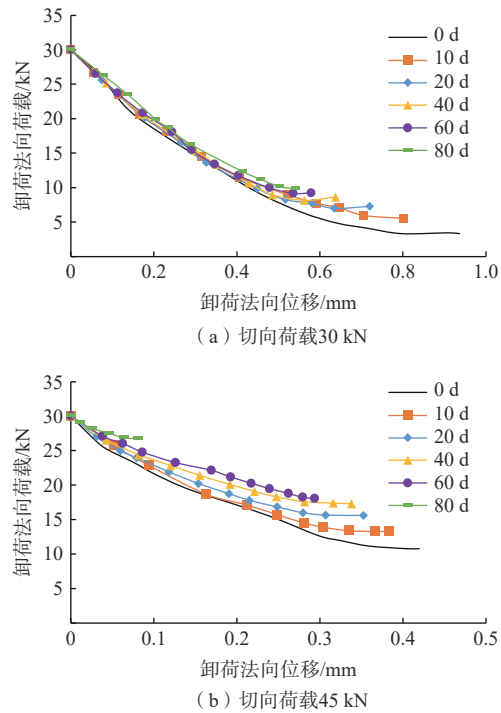


图 5 法向卸荷阶段荷载-位移曲线
Fig. 5 Load-displacement curve at normal unloading stage

泡天数后砂岩抗剪强度参数。

$$\sigma = F_n/A \tag{1}$$

$$\tau = F_s/A \tag{2}$$

式中: σ ——作用于剪切面上的法向应力/Pa;
 τ ——作用于剪切面上的切向应力/Pa;
 F_n ——作用于剪切面上的法向荷载/N;
 F_s ——作用于剪切面上的切向荷载/N;
 A ——剪切面面积/m²。

砂岩切向加载剪切破坏试验结果见表 3, 法向卸荷剪切破坏试验结果见表 4。试样经过相同的浸泡时

表 3 砂岩切向加载剪切试验结果							
Table 3 Results of tangential loading shear test of sandstone							
试样状态	不同法向应力下的切向应力水平					黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)
	F_n/kN						
	10	15	20	25	30		
	σ/MPa						
	2	3	4	5	6		
初始试样	7.71	8.80	10.23	11.59	12.43	5.26	50.66
浸泡10 d	6.98	7.95	9.58	10.87	11.68	4.49	50.89
浸泡20 d	6.52	7.26	9.08	10.23	11.18	3.94	50.89
浸泡40 d	5.80	6.77	8.55	9.85	10.42	3.35	50.89
浸泡60 d	5.56	6.25	8.20	9.28	10.02	3.08	49.96
浸泡80 d	5.51	6.54	7.83	9.02	10.16	3.11	49.64

间,切向加载剪切破坏所得黏聚力要高于法向卸荷剪切破坏得到的值,但内摩擦角却相反。由此可见,即使考虑岩石样本离散性,在不同剪切条件下所得试样的抗剪强度参数仍然具有明显的差异性。已有研究表明^[23],在进行变形分析或者是安全系数求解时,岩石的黏聚力和内摩擦角对目标值的影响各异,因此,根据边坡岩体的具体受力路径开展对应的剪切试验获取抗剪强度参数,对提高计算结果的准确性有着重要意义。

表4 砂岩法向卸荷剪切试验结果

Table 4 Results of normal loading shear test of sandstone

不同切向应力下的法向应力水平					黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)
试样状态	F_p /kN					
	30	35	40	45		
	τ /MPa					
	6	7	8	9		
初始试样	0.76	1.32	1.91	2.25	4.45	62.87
浸泡10 d	1.14	1.70	2.28	2.73	3.86	61.71
浸泡20 d	1.47	2.09	2.59	3.18	3.37	60.59
浸泡40 d	1.71	2.23	2.84	3.51	3.23	58.97
浸泡60 d	1.81	2.41	3.03	3.70	3.15	57.81
浸泡80 d	1.84	2.47	3.12		3.07	57.82

尽管不同剪切条件下试样的力学参数存在差异,但随着浸泡时间的增加,试样力学参数的弱化趋势一致。分别以2种剪切模式下初始试样的抗剪强度为基准,计算浸泡不同时间后试样的黏聚力、内摩擦角的降幅,结果如图6所示。

在浸泡10、20、40、60、80 d后,切向加载剪切所得黏聚力分别降低了15%、25%、36%、41%、40.5%,法向卸荷剪切所得黏聚力分别降低了13%、24%、28%、29%、31%,2种加载方式所得黏聚力随浸泡时间的增加均呈现出先快后慢的趋势。这与前人对千枚岩^[24]、

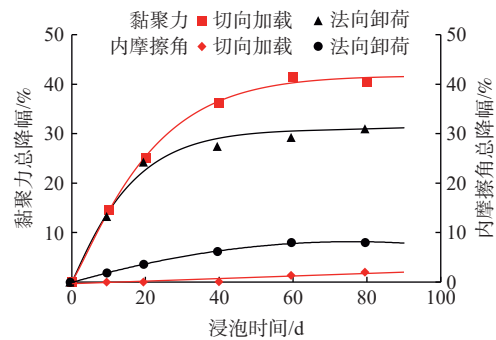


图6 砂岩抗剪强度参数损伤幅度

Fig. 6 Shear strength parameter damage amplitude of sandstone

白云岩^[25]、花岗岩^[26]长期浸泡后的三轴压缩试验规律较为一致。切向加载所得黏聚力降幅要大于法向卸荷,试样黏聚力受水岩作用的影响更大。经过80 d浸泡后,切向加载所得内摩擦角降低了2%,法向卸荷剪切所得内摩擦角降低了8%,试样内摩擦角受水岩作用的影响较小。不同加载路径下岩石抗剪强度参数随浸泡时间的损伤幅度不同,因此在考虑库水长期浸泡对岩石剪切力学性质的损伤分析时,边坡岩体的实际受力路径以及饱水历史过程同样不可忽视。

2.2 砂岩的剪切破坏特征

剪切试验后砂岩试样主裂纹的扩展模式如图7所示,第1种剪切裂纹扩展方向与剪切面夹角较小,两侧剪切裂纹在试样中部搭接后试样破坏,并形成一条平行于剪切面的“一字型”剪切主裂纹(图7a);第2种试样剪切裂纹扩展方向与剪切面有一定的夹角,并且左右两侧裂纹初始扩展方向近似平行,两侧剪切裂纹扩展至中部完成搭接,形成一条“S型”剪切主裂纹(图7b);第3种试样剪切裂纹扩展方向与剪切面也有一定的夹角,但左右两侧裂纹初始扩展方向延伸向同一侧,扩展至试样中部完成搭接,形成一条“M型”剪切主裂纹(图7c)。

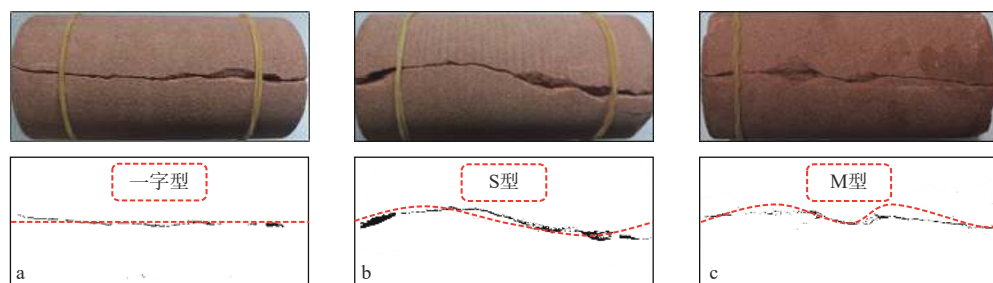
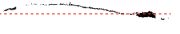


图7 砂岩试样剪切破坏模式

Fig. 7 Shear failure mode of sandstone samples

砂岩试样切向加载、法向卸荷剪切破坏模式如表5所示。可以看出剪切主裂纹与剪切面的偏差随

表 5 试样破坏模式
Table 5 Sample failure mode

试样状态		不同剪切试验方案试样破坏应力及破坏模式				
		切向加载 $\sigma=6.00$ MPa	法向卸荷 $\tau=9.00$ MPa	法向卸荷 $\tau=8.00$ MPa	法向卸荷 $\tau=7.00$ MPa	法向卸荷 $\tau=6.00$ MPa
初始试样	破坏时应力	$\sigma=6.00$ MPa, $\tau=12.40$ MPa	$\sigma=2.30$ MPa, $\tau=9.00$ MPa	$\sigma=1.90$ MPa, $\tau=8.00$ MPa	$\sigma=1.30$ MPa, $\tau=7.00$ MPa	$\sigma=0.80$ MPa, $\tau=6.00$ MPa
	破坏模式					
	素描图					
浸泡80 d	破坏时应力	$\sigma=6.00$ MPa, $\tau=10.16$ MPa	$\sigma=5.34$ MPa, $\tau=9.00$ MPa	$\sigma=3.12$ MPa, $\tau=8.00$ MPa	$\sigma=2.47$ MPa, $\tau=7.00$ MPa	$\sigma=1.84$ MPa, $\tau=6.00$ MPa
	破坏模式					
	素描图					

法向应力减小而增大, 试样剪切过程中裂纹的扩展受法向荷载限制作用较明显。当加载方式相同时, 浸泡 80 d 后的试样相较于初始试样, 其剪切主裂纹更为粗糙, 且在剪切主裂纹附近出现了不同程度的次生裂纹, 次生裂纹与剪切主裂纹的相交导致试样表面出现了一定程度的颗粒剥落现象。这与前人^[27]在酸性条件下浸泡细砂岩进行剪切试验, 砂岩剪切破坏时的裂纹开裂宽度相应增大, 裂纹开裂情况愈加复杂的结论接近, 但不能排除其结果受酸化作用的影响。

3 砂岩损伤细观机理分析

3.1 浸泡溶液变化特征

不同浸泡天数溶液参数如图 8 所示。溶液的 pH 值及电导率均随浸泡时间的增加而增大, 溶液的 pH

值最终稳定在 7.6 左右, 溶液的电导率增幅呈现先快后慢的趋势; 溶液中的 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 离子均随浸泡时间的增加而增大, 但整体上呈现先快后慢的增加趋势。

溶液中 Ca^{2+} 的质量浓度增幅最大, 其次是 Na^{+} , 而 K^{+} 、 Mg^{2+} 增幅较低。浸泡 80 d 后, 砂岩试样中 Mg、K、Ca、Na 元素占比分别降为 1.28%、1.02%、4.08%、0.76%。理论上, 溶液中离子含量变化的顺序 ($\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{2+}$) 应该与固体中元素损失量的顺序对应, 但是测试结果 ($\text{Ca} > \text{K} > \text{Na} > \text{Mg}$) 不能完全支持这个结论(图 8b), 原因可能是元素在固体样本(试样元素测试样本)中的离散性要比在液体样本(溶液离子测试样本)中的大。在浸泡过程中, 分析砂岩试样内矿物与溶液间发生反应见表 6^[28]。

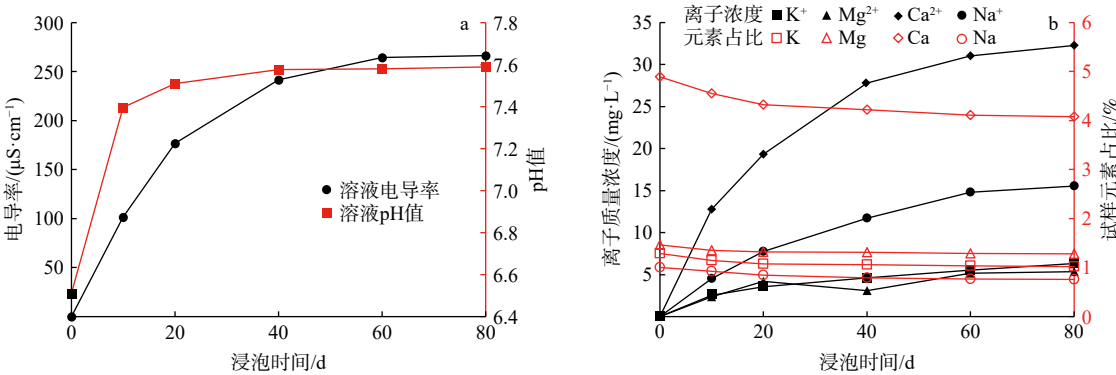


图 8 浸泡溶液随浸泡时间变化曲线
Fig. 8 Change of soaking solution with time

3.2 矿物成分及结构变化特征

不同浸泡天数砂岩试样的扫描电镜图像见图 9。在 2 000 倍镜下, 可以看到初始砂岩试样内部结构比

较完整, 可见大孔隙较少, 没有明显微裂纹, 石英、长石等矿物颗粒间被胶结物填充, 矿物颗粒间填充的较为密实; 浸泡 10 d, 伴随着碳酸盐岩矿物被溶蚀, 胶结

表6 反应方程

Table 6 Reaction equation

矿物名称	反应方程式
碳酸盐岩矿物	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 4\text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2\uparrow$
钾长石	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} = \text{K}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$
钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$

物间有孔隙出现,次生孔隙发育;浸泡 20 d,胶结物中的矿物继续被溶解、溶蚀,胶结物与矿物颗粒间胶结

变得疏松;浸泡 40 d,次生孔隙继续发育;浸泡 60 d,矿物颗粒依然较为完整,仅有部分矿物表面被溶蚀。综合上述扫描电镜结果,结合溶液中离子变化,可以看出砂岩试样中的矿物颗粒(石英等)受饱水时间影响较小,而胶结矿物(碳酸盐岩矿物、黏土矿物等)易受水岩作用的影响,在浸泡初期被溶解、溶蚀,导致岩石内部次生孔隙的发育、连通,从而导致砂岩抗剪特性的损伤。

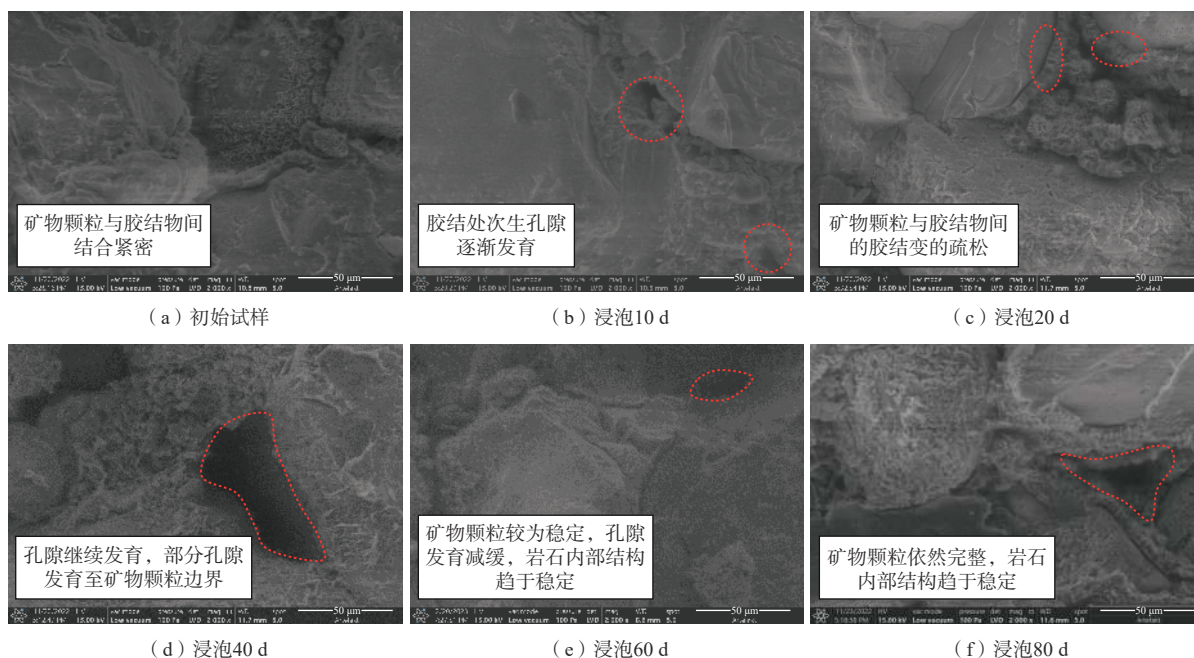


图9 不同状态下岩样的2000倍扫描电镜图像

Fig. 9 SEM image of the rock sample under different conditions

3.3 孔隙结构变化特征

核磁共振试验(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)可以通过测定饱水砂岩中水质子的弛豫特性,获得孔隙水在砂岩内部的数量和分布状态,从而获取砂岩的孔隙结构变化规律^[29]。通过核磁共振测试,砂岩试样孔隙参数变化如图10所示。试样孔隙度随浸泡时间的增加而增大,在浸泡的前20 d增幅较大,在20~60 d增幅较缓,呈现先快后慢的增加趋势(图10a);对不同孔径的孔隙进行分组:0~0.1 μm为小孔隙,0.1~10 μm为中孔隙,10 μm以上为大孔隙,可以看出随浸泡时间的增加,试样小孔隙占比逐渐减少,试样中孔隙占比逐渐增大,随浸泡时间的增加试样内部有小孔隙向中孔隙演化的趋势(图10b)。

真空强制饱水后的试样在持续浸泡的前60 d,其含水率仍然会有一定程度的增加,依据试样孔隙结构

的变化,结合扫描电镜结果分析:在持续浸泡的过程中,试样内部胶结物被溶解、溶蚀,导致次生孔隙发育,孔隙间连通率增加,导致水溶液进入渠道变多,试样含水率增加。

3.4 抗剪强度参数损伤机理分析

根据上述岩石细观结构的分析,水岩作用对岩石的细观损伤是岩石内部孔隙的发展,因此以孔隙度的变化建立损伤变量,可以反映砂岩受水岩作用影响的损伤程度。以水岩作用后砂岩孔隙度均值定义损伤变量(D)^[7]:

$$D = \frac{\varphi_n - \varphi_0}{1 - \varphi_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: φ_n ——浸泡不同天数砂岩孔隙度/%, $n=0, 10, 20, 40, 60, 80$;

φ_0 ——初始试样的孔隙度/%。

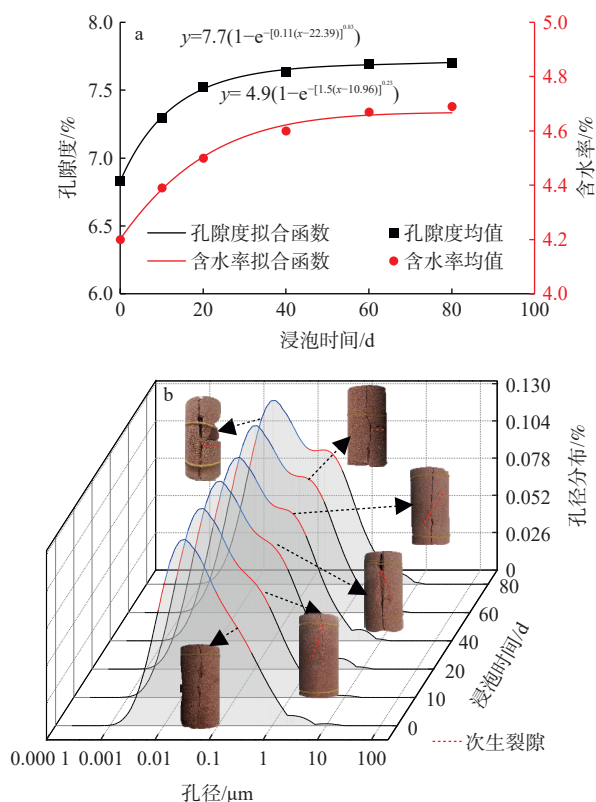


图 10 砂岩试样孔隙参数变化曲线

Fig. 10 Variation curves of pore parameters of sandstone samples

砂岩抗剪强度参数与损伤度的关系如图 11 所示, 可以看出在切向加载剪切和法向卸荷剪切条件下, 砂岩黏聚力随损伤度增大而减小, 但内摩擦角的变化相对不明显。黏聚力与岩土体自身的胶结密不可分^[30], 依据砂岩浸泡过程中矿物成分的变化及孔隙的演化分析可知, 在砂岩浸泡前 20 d, 水溶液通过试样内部原生孔隙等通道进入试样内部, 与可接触的胶结物发生反应, 引起矿物的溶解、溶蚀, 导致次生孔隙的发育与演化, 损伤度逐渐积累, 在宏观上表现为黏聚力的

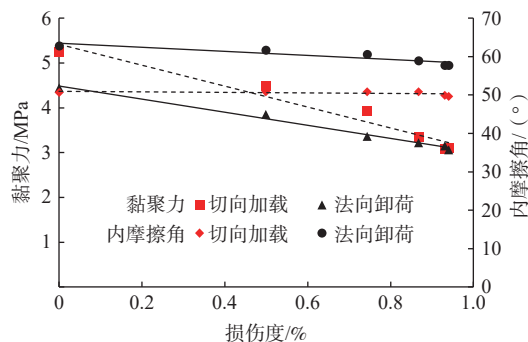


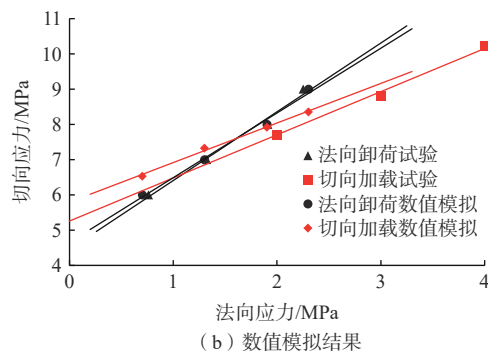
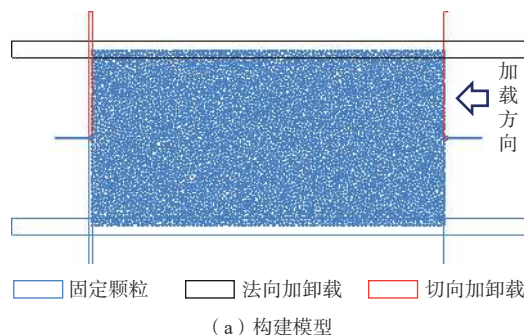
图 11 砂岩抗剪强度参数与损伤度关系

Fig. 11 Relationship between shear strength parameters and damage degree of sandstone

快速降低; 在砂岩浸泡 60 d, 易与水接触并反应的胶结矿物减少, 石英等矿物颗粒较为稳定, 溶液中离子浓度增幅减缓, 孔隙的发育减慢, 在宏观上表现为黏聚力的缓慢降低。在此过程中, 作为骨架颗粒的石英等在孔隙水进入之后受到的影响有限, 故对内摩擦角的变化相对没有那么明显。

3.5 抗剪强度参数差异细观机理分析

为了分析不同加载路径下岩石细观层面的力学行为, 采用 PFC^{2D} 颗粒流软件进行数值模拟研究^[31]。标定细观参数后, 法向卸荷试验中剪应力为 6, 7, 8, 9 MPa 时试样破坏的正应力值分别为 0.7, 1.3, 1.9, 2.3 MPa, 与室内试验结果相符。以正应力为 0.7, 1.3, 1.9, 2.3 MPa 进行切向加载剪切数值模拟试验, 所得剪应力如图 12 所示。结果显示切向加载所得黏聚力高于法向卸荷所得, 切向加载所得内摩擦角低于法向卸荷所得, 与室内试验结果一致。

图 12 PFC^{2D} 数值模拟试验Fig. 12 PFC^{2D} numerical simulation test

颗粒物质力学认为力链网络的演变决定颗粒体系的宏观力学行为^[32], 不同加载路径下岩石的宏观力学特性由其内部细观力链网络所决定。

切向加载剪切试验过程中, 颗粒间力链变化如图 13 所示: 初始条件下, 力链在不同方向上均匀分布, 施加法向荷载后, 力链以竖向发展为主; 一旦启动切向加载, 力链开始由竖向向切向方向偏移; 切向加

载过程中,伴随着力链的传递、增强,剪应力逐渐增加至峰值,此时力链沿近似对角线方向聚拢;伴随着剪切面附近力链被剪断,试样进入破坏阶段,剪应力逐渐降低;进入残余阶段后,力链变得无序。

法向卸荷剪切过程中,随着法向荷载的逐渐减小,力链的传递方向逐渐往切向方向偏移(图14)。当法向荷载卸载至最低值时,右上、左下端部的力链传递方向与切向方向几乎平行,剪切面附近部分力链被

剪断,拉裂纹发育,易发生张剪性破坏(图14b),这与室内试验所得结果一致(表4)。张剪破坏的岩石相较于直剪破坏的岩石剪切主裂纹与理论剪切面间的偏差值较大,增大了有效剪切面积,实际可承担剪切应力增大,因对其贡献最大的是骨架颗粒,故内摩擦角也更大,而提供黏聚力的充填胶结物质在张剪破坏中的贡献较小,故法向卸荷获得的黏聚力也更低。

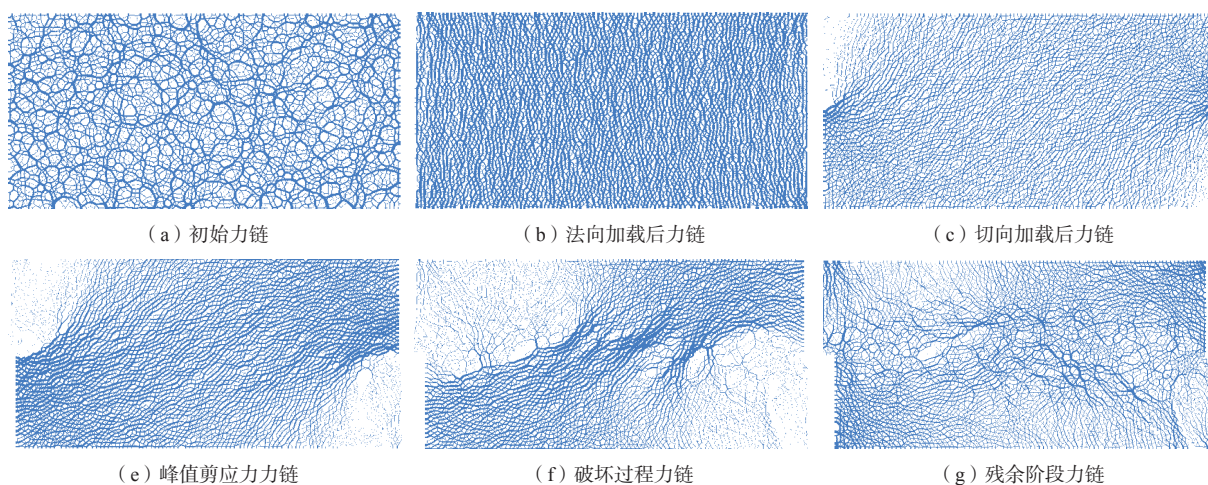


图13 切向加载剪切过程中力链演化模式

Fig. 13 Force chain evolution model during tangential loading shear

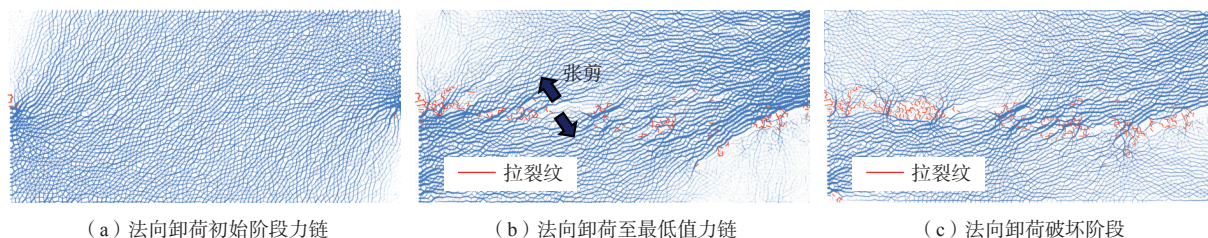


图14 法向卸荷剪切过程中力链演化

Fig. 14 Force chain evolution during normal unloading shear

4 结论

(1) 长时浸泡对砂岩黏聚力的损伤效应比内摩擦角明显, 60 d 浸泡后损伤趋稳, 但切向加载试样的黏聚力(40.5%)比法向卸荷试样的黏聚力(31%)降低幅度大, 而对内摩擦角的影响仅分别为 2%(切向加载)和 8%(法向卸荷), 主要原因是砂岩长期浸泡过程中易与水反应的胶结物被溶解、溶蚀, 导致试样内部次生孔隙的发育与演化, 而石英等颗粒骨架受到的影响较小, 在宏观上表现为黏聚力的显著降低和内摩擦角的轻微变化。

(2) 不同剪切条件下砂岩试样剪切主裂纹呈现出“一字型”“S型”“M型”3种模式, 其中, 法向卸荷剪切试验中试样破裂面偏离剪切平面的程度更明显, 这是由于破坏时法向应力减小, 导致剪切主裂纹与理论剪切面之间偏差增大。经历长期浸泡后试样剪切主裂纹更为粗糙, 且在剪切主裂纹附近出现了不同程度的次生裂纹, 破坏模式更为复杂。

(3) 法向卸荷剪切条件下, 法向应力减小导致剪切主裂纹与理论剪切面之间偏差增大, 实际剪切面的增大提高了岩石可承担的剪应力峰值, 因对其贡献最大的是骨架颗粒, 故内摩擦角也更大。法向卸荷剪切

过程中, 试样出现了明显的张剪破坏特征, 而提供黏聚力的充填胶结物质在张剪破坏中的贡献较小, 故法向卸荷所得黏聚力也更低, 这是同种岩石在切向加载剪切与法向卸荷剪切条件下力学参数出现明显差异的根本原因。

参考文献 (References):

- [1] SUN Shaorui, LI Kai, LE Huilin, et al. Study on the deterioration characteristics of greenschist under hydrochemical action and the disaster-causing mechanism in slope[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8): 315.
- [2] 齐豫. 水-岩作用下节理岩体剪切力学特性劣化效应及机理 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2021. [QI Yu. Deterioration effect and mechanism of shear mechanical properties of jointed rock mass under water-rock interaction[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 骆韬, 郭保华, 焦峰, 等. 水化学作用对砂岩力学性质影响试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5): 1316 – 1322. [LUO Tao, GUO Baohua, JIAO Feng, et al. The influence of hydrochemical erosion on the mechanical characteristics of sandstone[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(5): 1316 – 1322. (in Chinese with English abstract)]
- [4] WANG Weinan, YAO Qiangling, TANG Chuanjin, et al. Experimental study on the shear characteristics and weakening mechanism of water-bearing rock joints[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(10): 7653 – 7668.
- [5] 郑东普, 李克钢, 吴勇. 含水状态对白云岩剪切特性影响规律的试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2013, 33(4): 20 – 23. [ZHENG Dongpu, LI Kegang, WU Yong. Experimental study on influence of moisture content on shear property of dolomite[J]. *Mining Research and Development*, 2013, 33(4): 20 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 常五岳. 易崩解红砂岩在不同含水率下的剪切性质分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022. [CHANG Wuyue. Analysis of shear properties of collapsible red sandstone under different water content[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李鹏, 刘建, 李国和, 等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380 – 386. [LI Peng, LIU Jian, LI Guohe, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 380 – 386. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 周罕, 曹平, 张科. 昔格达组黏土岩和粉砂岩现场直剪试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3544 – 3550. [ZHOU Han, CAO Ping, ZHANG Ke. In-situ direct shear test on Xigeda Formation clay stone and siltstone[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(10): 3544 – 3550. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 赵志宏. 岩石裂隙水-岩作用机制与力学行为研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊2): 3063 – 3073. [ZHAO Zhihong. Study on water-rock interaction mechanisms and mechanical behaviors of single rock fractures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup 2): 3063 – 3073. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 邓华锋, 齐豫, 李建林, 等. 水-岩作用下断续节理砂岩力学特性劣化机理 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(4): 634 – 643. [DENG Huafeng, QI Yu, LI Jianlin, et al. Degradation mechanism of intermittent jointed sandstone under water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 634 – 643. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王艳磊, 唐建新, 江君, 等. 水-岩化学作用下灰砂岩的力学特性与参数损伤效应 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 227 – 235. [WANG Yanlei, TANG Jianxin, JIANG Jun, et al. Mechanical properties and parameter damage effect of malmstone under chemical corrosion of water-rock interaction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 227 – 235. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈小川, 郭杨, 张振华, 等. 干湿循环作用下老黏土抗剪强度劣化试验研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(8): 172 – 179. [CHEN Xiaochuan, GUO Yang, ZHANG Zhenhua, et al. Experimental study on shear strength deterioration of old clay under dry-wet cycle[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(8): 172 – 179. (in Chinese)]
- [13] 周翠英, 李伟科, 向中明, 等. 水-应力作用下软岩细观结构摩擦接触分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2458 – 2466. [ZHOU Cuiying, LI Wei, XIANG Zhongming, et al. Analysis of mesoscopic frictional contacts in soft rocks under water-stress interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9): 2458 – 2466. (in Chinese with English abstract)]

- [14] NOUAILLETAS O, PERLOT C, RIVARD P, et al. Impact of acid attack on the shear behaviour of a carbonate rock joint[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(6): 1439 – 1451.
- [15] 李远耀. 三峡库首区顺层基岩岸坡变形机制与稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007. [LI Yuanyao. Study on deformation mechanism and stability of bedding foundation rock bank slope in the head area of Three Gorges Reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 周剑, 邓茂林, 李卓骏, 等. 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 136 – 143. [ZHOU Jian, DENG Maolin, LI Zhuojun, et al. Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 136 – 143. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 朱冬雪, 许强, 李松林. 三峡库区大型-特大型层状岩质滑坡成因模式及地质特征分析[J]. 地质科技通报, 2020, 39(2): 158 – 167. [ZHU Dongxue, XU Qiang, LI Songlin. Genetic types and geological features of large scale and extra-large scale layered landslides in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(2): 158 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 喻章. 杉树槽滑坡滑带土强度衰减特性及失稳机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018. [YU Zhang. Study on strength attenuation characteristics of slip soil failure mechanism of Shanshucao landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 彭轩明, 贾永刚, 常宏. 长江三峡工程库区龙王庙滑坡群稳定性分析及整治[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2004, 34(2): 289 – 296. [PENG Xuanming, JIA Yonggang, CHANG Hong. Stability analysis and control of Longwangmiao landslides in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2004, 34(2): 289 – 296. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 赵丹旗, 付昱凯, 侯晓坤, 等. 不同应力路径下饱和重塑黄土的力学特性[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 74 – 80. [ZHAO Danqi, FU Yukai, HOU Xiaokun, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under different stress paths[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(6): 74 – 80. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 杨超, 蒋溟南, 岳六一, 等. 法向卸荷条件下非贯通节理岩体剪切力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(9): 1741 – 1750. [YANG Chao, JIANG Haonan, YUE Liuyi, et al. Shear mechanical properties of rock mass with discontinuous joints under unloading normal stress[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(9): 1741 – 1750. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for rock tests in water and hydropower projects: SL/T 264—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese)]
- [23] 宛良朋, 许阳, 李建林, 等. 岩体参数敏感性分析对边坡稳定性评价影响研究——以大岗山坝肩边坡为例[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1737 – 1744. [WAN Liangpeng, XU Yang, LI Jianlin, et al. Sensitivity analysis of the effect of rock mass parameters on slope stability evaluation: A case study of abutment slope of Dagangshan[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1737 – 1744. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 赵建军, 解明礼, 李涛, 等. 饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1449 – 1454. [ZHAO Jianjun, XIE Mingli, LI Tao, et al. Softening effect of phyllite with water saturation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(6): 1449 – 1454. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 魏长茂. 静态化学溶蚀作用下白云岩力学特性劣化机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2022. [WEI Changmao. Study on deterioration mechanism of mechanical properties of dolomite under static chemical dissolution[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 陈绪新, 付厚利, 秦哲, 等. 不同饱水条件下蚀变岩边坡稳定性分析[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 151 – 156. [CHEN Xuxin, FU Houli, QIN Zhe, et al. Slope stability analysis of altered rocks under different saturated conditions[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(1): 151 – 156. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 许江, 吴慧, 程立朝, 等. 酸性条件下砂岩剪切破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 2): 3897 – 3903. [XU Jiang, WU Hui, CHENG Lichao, et al. Experimental study of shearing failure properties of sandstone under acidic conditions[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup 2): 3897 – 3903. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 韩铁林, 陈蕴生, 师俊平, 等. 水化学腐蚀对砂岩力学特性影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3064 – 3072. [HAN Tielin, CHEN Yunsheng, SHI Junping, et al. Experimental study of mechanical characteristics of sandstone subjected to hydrochemical erosion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 2): 3064 – 3072. (in Chinese with English abstract)]
- [29] SUN Qiancheng, WEI Can, SHA Ximan, et al. Study on the influence of water-rock interaction on the stability of schist slope[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7141.
- [30] 姚海林, 刘少军, 程昌炳. 一种天然胶结土粘聚力的微观本质 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 871 – 874. [YAO Hailin, LIU Shaojun, CHENG Changbing. Scopic essence of cohesion of a natural cemented soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 871 – 874. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 等. 预制裂隙岩样宏细观力学行为颗粒流数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(4): 86 – 92. [WANG Xingchen, WANG Zhiliang, HUANG Youpeng, et al. Particle flow simulation of macro-and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(4): 86 – 92. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 孙其诚, 王光谦. 颗粒物质力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. [SUN Qicheng, WANG Guangqian. Introduction to granular material mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]

编辑: 刘真真