

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.211>



干湿循环作用下云母石英片岩 抗剪性能劣化规律及机理

李志刚^{1,2}, 叶宏林¹, 代云云¹, 徐光黎^{3*}, 盛逸凡³, 马 郅⁴

1. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225127
2. 核工业湖州勘测规划设计研究院股份有限公司, 浙江湖州 313000
3. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074
4. 中南勘察设计院集团有限公司, 湖北武汉 430074

摘要: 在干湿循环作用下, 片岩的抗剪性能劣化对片岩边坡长期稳定性具有重要影响. 以鄂西北广泛分布的云母石英片岩为研究对象, 通过开展一系列室内试验, 揭示其抗剪性能劣化规律及机理. 吸水性试验及直剪试验结果表明, 云母石英片岩的吸水率随着干湿循环次数增加呈逐渐上升的趋势, 抗剪强度及残余抗剪强度随干湿循环次数的增加呈逐渐下降的趋势, 抗剪性能劣化效应明显. 结合扫描电镜测试所得云母石英片岩微观结构变化规律, 揭示其抗剪性能劣化机理: 干湿循环作用下, 云母石英片岩片理面逐渐扩展开裂, 内部矿物颗粒强度软化, 颗粒间胶结弱化, 岩石骨架变得松散; 粘聚力主要受矿物颗粒之间的胶结程度影响, 劣化速率较快; 内摩擦角主要受矿物颗粒嵌固程度和颗粒本身强度的影响, 劣化速度相对较慢.

关键词: 云母石英片岩; 干湿循环; 抗剪强度; 劣化机理; 工程地质.

中图分类号: P642.3

文章编号: 1000-2383(2024)03-1028-11

收稿日期: 2022-03-04

Law and Mechanism of Shear Degradation of Mica Quartz Schist under Dry-Wet Cycles

Li Zhigang^{1,2}, Ye Honglin¹, Dai Yunyun¹, Xu Guangli^{3*}, Sheng Yifan³, Ma Yun⁴

1. College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China
2. Nuclear Industry Huzhou Survey Planning & Design Institute Co., Ltd., Huzhou 313000, China
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. Central South Survey Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430074, China

Abstract: The deterioration of shear properties of schist under dry-wet cycles has an important effect on the long-term stability of schist slope. Taking the mica-quartz schist widely distributed in Northwest Hubei as the research object, a series of laboratory tests were carried out to reveal the law and mechanism of its shear deterioration. The results of water absorption tests and direct shear tests show that the water absorption of mica-quartz schist increases, while the shear strength and residual shear strength decrease gradually with the increase of the number of dry-wet cycles, and the shear properties

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41772314); 江苏省高等学校自然科学基金项目(Nos. 20KJB170020, 21KJB570010); 湖北省科技厅重点研发项目(No. 2021BCA219); 湖北省自然资源厅科技项目(No. ZRZY2022KJ17).

作者简介: 李志刚(1988-), 男, 讲师, 主要从事岩土力学方面的研究工作. ORCID: 0000-0001-5631-8219. E-mail: lzgdy@yzu.edu.cn

* **通讯作者:** 徐光黎, E-mail: xu1963@cug.edu.cn

引用格式: 李志刚, 叶宏林, 代云云, 徐光黎, 盛逸凡, 马郅, 2024. 干湿循环作用下云母石英片岩抗剪性能劣化规律及机理. 地球科学, 49(3): 1028-1038.

Citation: Li Zhigang, Ye Honglin, Dai Yunyun, Xu Guangli, Sheng Yifan, Ma Yun, 2024. Law and Mechanism of Shear Degradation of Mica Quartz Schist under Dry-Wet Cycles. *Earth Science*, 49(3): 1028-1038.

show obvious deterioration effect. Based on the changes of mica-quartz schist microstructure obtained by scanning electron microscopy, the deterioration mechanism of mica-quartz schist is revealed. Under the action of dry-wet cycles, the schist plane gradually expands and cracks, the strength of internal mineral particles is softened, the cementation between particles is weakened, and the rock skeleton becomes loose. What's more, the cohesion is mainly affected by the degree of cementation between mineral particles, so the deterioration rate is fast. While the internal friction angle is mainly affected by the degree of embeddedness and the strength of mineral particles, so the deterioration rate is relatively slow.

Key words: mica quartz schist; dry-wet cycles; shear strength; deterioration mechanism; engineering geology.

0 引言

鄂西北地区广泛分布的片岩是一类片理发育的软弱变质岩,抗风化能力弱、力学性能差、遇水易软化(Yin *et al.*, 2020).该地区雨热同期,片岩边坡岩体易受降雨-蒸发型干湿循环作用影响,发生各种物理、化学乃至力学性质的变化使得稳定性下降,在一些极端条件下极易发生滑坡、崩塌等地质灾害(周大华等, 2013; 刘廷, 2015).因此,揭示干湿循环作用下片岩抗剪性能劣化规律及机理对于片岩边坡稳定性研究具有重要意义.

目前,关于岩石在干湿循环作用下力学性能劣化规律的研究日益增多.邓华锋等(2016)、Liu *et al.*(2018)、Qin *et al.*(2018)、Yuan *et al.*(2019)通过单轴压缩试验研究了砂岩、花岗岩等岩石的抗压性能在干湿循环作用下的劣化规律.张振华等(2017)、Zhao *et al.*(2017)采用巴西劈裂试验研究了砂岩抗拉性能在干湿循环作用下的劣化规律.此外,学者们还采用多种方法对干湿循环作用下岩石的抗剪性能进行了研究,如刘新荣等(2017)针对砂岩、刘新喜等(2022)针对炭质页岩采用了三轴压缩试验, Li *et al.*(2021)针对砂岩采用了直剪试验, 亢金涛等(2019)针对软硬互层岩体采用数值模拟方法研究了各类岩石抗剪性能在干湿循环作用下的劣化规律.以上研究表明,干湿循环作用会对岩石造成不可逆的渐进性损伤,使得单轴抗压强度、变形模量、抗拉强度、粘聚力、内摩擦角等力学参数普遍减小,并且大多表现为在干湿循环作用初期劣化较为强烈,随着干湿循环次数的增加劣化速率逐渐减弱,不同种类岩石的力学指标劣化速度和劣化幅度存在较大差别.

随着现代科技的发展,许多学者通过扫描电镜(Yao *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021)、核磁共振(安然等, 2020; 李长冬等, 2023)、CT扫描(刘新荣等, 2016)等测试技术,对干湿循环作用下岩石微观结构变化进行测试,以揭示岩石物理力学

性能劣化机理.研究表明,岩石随着干湿循环次数的增加,其微观结构越松散,颗粒空间排布越不均匀,微裂纹不断扩展并相互搭接,块状构造逐步破碎化,进而导致其宏观力学性能的劣化(Özbek, 2014; Xie *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2019).但不同岩石的矿物成分、微观结构差异较大,在干湿循环作用下其变化规律也不尽相同,进而导致不同岩石的力学性能劣化规律存在差异.

片岩是一种片理密集发育的变质岩,其矿物组成及微观结构与现有研究的岩石有较大区别,其抗剪性能的劣化对片岩边坡稳定性具有重要影响.本文以鄂西北地区广泛分布的云母石英片岩为研究对象,通过吸水性试验、直剪试验,获得其吸水率与抗剪性能在干湿循环作用下的劣化规律,并通过扫描电镜测试其微观结构的变化过程,揭示其抗剪性能在干湿循环作用下的劣化机理,为该地区片岩边坡长期稳定性评价及支护设计提供理论依据.

1 试验设计

1.1 云母石英片岩试样及制备

云母石英片岩岩样取自十巫高速青岩隧道边坡钻孔岩心,取样深度为120~140 m.岩样颜色呈灰黑色,微风化,片理面倾角 $70^{\circ}\sim 75^{\circ}$.通过X射线粉晶衍射试验测得岩样矿物成分及含量分别为:白云母21.59%,绿泥石28.64%,石英22.75%,钠长石8.95%,方解石9.80%,白云石6.41%,微斜长石1.86%(质量分数).其中,强度较低、遇水易软化的片状矿物白云母和绿泥石总含量为50.23%,占比较高,对云母石英片岩整体力学性能影响较大.此外,测得云母石英片岩岩样天然密度为 2.71 g/cm^3 、干密度为 2.70 g/cm^3 、饱和密度为 2.73 g/cm^3 、初始含水率为0.05%、饱和吸水率为0.17%.可知,微风化状态下的云母石英片岩的天然含水率和饱和吸水率都较小,其结构致密、孔隙度较低.

用于直剪试验的云母石英片岩试样通过直接



图1 云母石英片岩试样

Fig.1 Mica quartz schist samples

切割、磨平钻孔岩心获得,试样直径为 56 mm,高为 56 mm,高径比为 1:1.挑选出外观、波速、密度差距较小,且片理倾角为 75° 的试样进行试验,以减小试样本身存在的差异对试验结果产生影响,挑选出的试样如图 1 所示.为方便干湿循环处理试样及后期开展直剪试验,试验前首先对试样进行分组编号.试样编号规则以 S_1 -2-3 为例, S_1 代表片岩直剪试验;2 代表试样的组号,相同组号进行相同干湿循环次数处理;3 代表试样在本组中的编号,不同的试样编号对应着直剪试验中所施加的不同法向荷载.

1.2 试验方案

试验中,为了模拟降雨-蒸发型干湿循环作用,并且考虑缩短试验周期、统一试样吸水 and 干燥程度,采用以下方案对试样进行干湿循环处理:先将岩样放入电热恒温鼓风烘箱中以 105°C 温度风干 24 h,待岩样冷却至室温 (20°C 左右),再将岩样采用自由吸水法浸泡 48 h,以上过程定义为 1 次干湿循环.烘干或浸泡试样前,均采用电子天平称量其重量,以计算片岩试样浸泡后的吸水率.分别在 1、3、5、10、15、20 次干湿循环结束后,取 1 组试样进行直剪试验,即在岩样饱水状态下测其抗剪强度.此外,取一组天然试样直接采用自由吸水法浸泡 48 h 后进行直剪试验,将其定为 0 次干湿循环,作为不同干湿循环作用后直剪试验的对照组.

直剪试验采用 NKYS-500 型岩石直剪仪,依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-2013) 开展.直剪试验过程中,同种试样在不同法向荷载下分别进行 5 次试验,法向荷载依次取值为 3 MPa、6 MPa、9 MPa、12 MPa、15 MPa.保持法向荷载恒定,剪切荷载根据预估的最大值分 8~12 级施加.试样破坏后,继续施加剪切荷载,直至测出趋于稳定的残余剪切荷载值,直剪试验如图 2 所示.

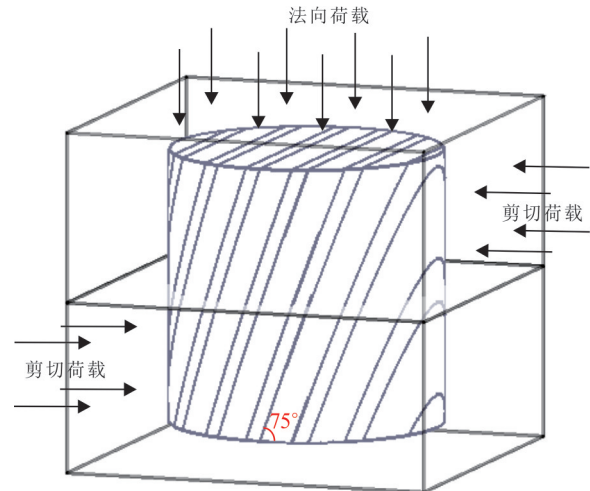


图2 云母石英片岩直剪试验示意

Fig.2 Schematic diagram of direct shear test of mica quartz schist

2 试验结果分析

2.1 云母石英片岩吸水率变化规律

吸水率是岩石非常重要的水理性质之一,在一定情况下反映了岩石中孔隙的发育.通过测定云母石英片岩在不同干湿循环次数下的吸水率,可以分析干湿循环作用对岩石吸水性和孔隙的影响.通过称量不同干湿循环作用后云母石英片岩试样干燥状态和饱水状态的质量计算其吸水率,所得吸水率随干湿循环次数变化规律如图 3 所示.

由图 3 可知,云母石英片岩的初始含水率为 0.17%,当干湿循环 1 次时,吸水率为 0.18%,增加幅度为 5.88%;干湿循环 10 次时,吸水率为 0.24%,

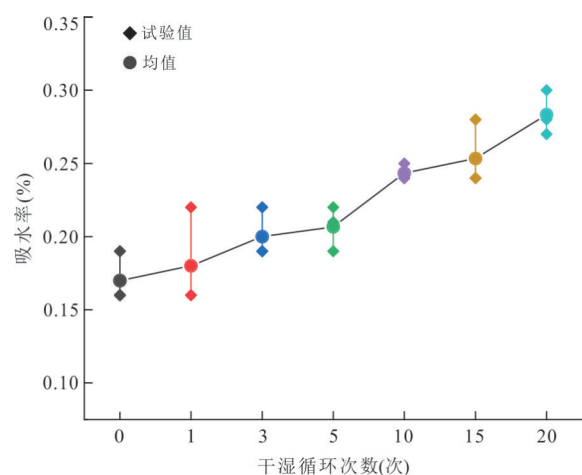


图3 干湿循环作用下云母石英片岩吸水率变化规律

Fig.3 Water absorption variation of mica quartz schist under different dry-wet cycles

增加幅度为41.18%,且随着干湿循环次数的加大,吸水率呈上升的趋势;当干湿循环达到20次时,吸水率变为0.28%,增长幅度达到了64.71%。可见,云母石英片岩的吸水率随着干湿循环次数增加呈大幅上升的趋势,且增加值随着干湿循环次数的增大而增大,表明干湿循环作用使得云母石英片岩孔隙大幅增长、连

通,进而使得其吸水性增强,力学性能劣化。

2.2 云母石英片岩抗剪性能劣化规律

2.2.1 峰值剪应力劣化规律

不同干湿循环作用下云母石英片岩直剪试验相关试验数据,以及依据Mohr-Coulomb破坏准则拟合计算得出的抗剪强度参数粘聚力、内摩擦角和残余抗剪强度参数残余粘聚力、残余内摩擦角如表1所示。

表1 干湿循环作用下云母石英片岩直剪试验结果

Table 1 Direct shear test results of mica quartz schist under wet-dry cycles

岩样编号	干湿循环次数	法向应力 σ_n (MPa)	峰值剪应力 τ_{max} (MPa)	残余剪应力 τ' (MPa)	粘聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ (°)	残余粘聚力 c' (MPa)	残余内摩擦角 φ' (°)
S ₁ -0-1	0	3.00	18.81	11.16	16.89	39.01	8.77	39.35
S ₁ -0-2		6.00	22.64	14.03				
S ₁ -0-3		9.00	24.23	15.63				
S ₁ -0-4		12.00	26.46	18.81				
S ₁ -0-5		15.00	27.42	21.05				
S ₁ -1-1	1	3.00	18.18	10.2	16.07	36.65	8.36	37.81
S ₁ -1-2		6.00	20.09	12.76				
S ₁ -1-3		9.00	22.00	13.71				
S ₁ -1-4		12.00	24.55	17.54				
S ₁ -1-5		15.00	26.15	19.45				
S ₁ -2-1	3	3.00	17.80	9.89	15.25	35.45	8.13	36.24
S ₁ -2-2		6.00	18.54	12.75				
S ₁ -2-3		9.00	21.68	13.39				
S ₁ -2-4		12.00	23.28	15.94				
S ₁ -2-5		15.00	25.66	17.54				
S ₁ -3-1	5	3.00	16.58	9.57	13.81	34.29	7.75	35.45
S ₁ -3-2		6.00	17.54	12.43				
S ₁ -3-3		9.00	19.45	13.07				
S ₁ -3-4		12.00	22.96	15.64				
S ₁ -3-5		15.00	24.55	16.90				
S ₁ -4-1	10	3.00	15.94	8.85	13.17	34.21	7.13	31.63
S ₁ -4-2		6.00	16.58	10.84				
S ₁ -4-3		9.00	18.18	13.07				
S ₁ -4-4		12.00	22.32	15.63				
S ₁ -4-5		15.00	24.23	16.58				
S ₁ -5-1	15	3.00	15.63	8.44	12.76	33.82	6.47	31.17
S ₁ -5-2		6.00	16.43	10.84				
S ₁ -5-3		9.00	17.86	12.12				
S ₁ -5-4		12.00	21.36	12.27				
S ₁ -5-5		15.00	23.28	15.31				
S ₁ -6-1	20	3.00	15.31	8.29	12.40	33.02	6.29	30.86
S ₁ -6-2		6.00	15.94	10.65				
S ₁ -6-3		9.00	17.22	12.12				
S ₁ -6-4		12.00	20.73	12.27				
S ₁ -6-5		15.00	22.96	15.31				

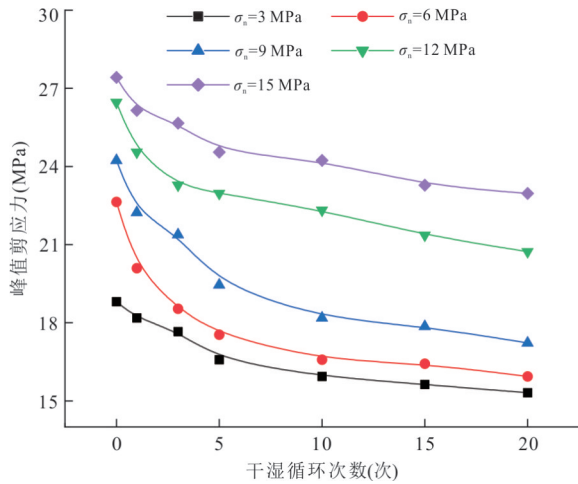


图4 干湿循环作用下云母石英片岩峰值剪应力变化规律
Fig.4 Peak shear stress variation of mica quartz schist under dry-wet cycles

根据表 1 中的试验数据,得到云母石英片岩的峰值剪应力随干湿循环次数的变化规律,如图 4 所示.在干湿循环作用初期,尤其是前 5 次循环,不同法向应力下试样的峰值剪应力下降明显,后期逐渐趋于稳定.在经历 5 次干湿循环作用后,法向应力为 3、6、9、12、15 MPa 时的峰值剪应力劣化程度分别为 11.86%、22.53%、19.73%、13.23%、10.47%,20 次干湿循环作用后劣化程度达到 18.62%、29.59%、28.93%、21.66%、16.27%,前 5 次干湿循环后不同法向应力下峰值剪应力分别下降了总劣化程度的 63.69%、76.14%、68.20%、61.08%、66.01%,均占总劣化度的 60% 以上.此外,在不同法向应力下,云母石英片岩的劣化趋势也存在一定差异.在相同干湿循环次数下,法向应力在 6~12 MPa 时云母石英片岩峰值剪应力劣化程度较大,在 3 MPa 和 15 MPa 时劣化程度较小,且法向应力在 6~12 MPa 时,峰值剪应力的下降趋势表现出更明显的非线性特征.

2.2.2 抗剪强度及残余抗剪强度劣化规律 云母石英片岩抗剪强度参数(粘聚力和内摩擦角),以及残余抗剪强度参数(残余粘聚力和残余内摩擦角)随干湿循环作用变化规律如图 5 所示.针对抗剪强度和残余抗剪强度参数,分别通过式(1)计算得到抗剪强度参数和残余抗剪强度参数劣化度,如图 6 所示.

$$D_n = \frac{J_0 - J_n}{J_0} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, D_n 为劣化度, J_0 为 0 次干湿循环云母石英片岩

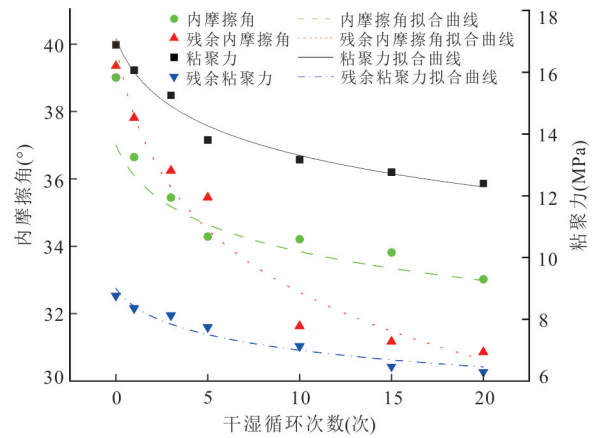


图5 内摩擦角和粘聚力劣化曲线

Fig.5 Deterioration curve of internal friction angle and cohesion

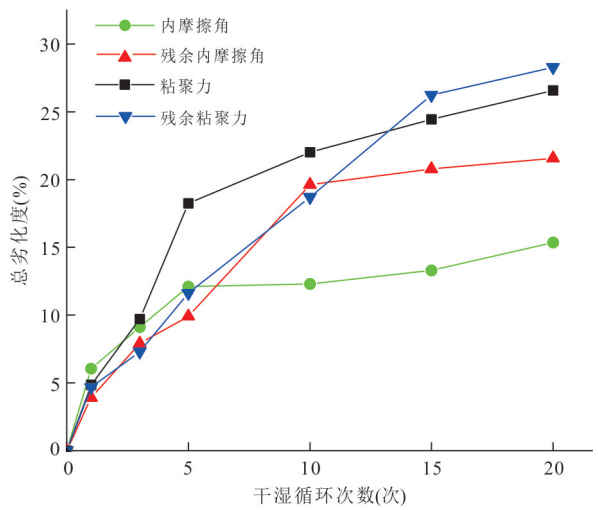


图6 内摩擦角和粘聚力总劣化曲线

Fig.6 Total deterioration curve of internal friction angle and cohesion

(残余)抗剪强度参数, J_n 为第 n 次干湿循环云母石英片岩(残余)抗剪强度参数.

从图 5 和图 6 可以看出,干湿循环作用下云母石英片岩试样粘聚力和内摩擦角劣化趋势较为明显,劣化规律类似,在前 5 次干湿循环下劣化速度较快、劣化幅度较大,占总劣化度的 60% 以上,之后劣化趋势渐缓.粘聚力的下降幅度大于内摩擦角的变化,干湿循环 5 次后,粘聚力下降了 18.24%,内摩擦角下降了 12.1%,干湿循环 20 次后,粘聚力下降了 26.58%,内摩擦角下降了 15.36%.粘聚力和内摩擦角的阶段劣化度相差较大,粘聚力在 15~20 次循环时阶段劣化度最小,在 3~5 次循环时最大;内摩擦角阶段劣化度在 5~10

次干湿循环时最小,在 1~3 次循环时最大.云母石英片岩内摩擦角和粘聚力的劣化效应应具有明显的非均匀性,其随干湿循环劣化规律拟合公式如下:

$$c(n) = 16.20 - 1.28\ln(n + 1), R^2 = 0.97, \quad (2)$$

$$\varphi(n) = 36.22 - 0.99\ln(n + 1), R^2 = 0.95, \quad (3)$$

其中, c 为粘聚力, φ 为内摩擦角, n 为干湿循环次数.

从图 5 和图 6 可以看出,干湿循环作用下云母石英片岩试样残余粘聚力和残余内摩擦角劣化趋势与粘聚力和内摩擦角的劣化趋势基本一致,前期劣化速度快、幅度大,后期劣化速度慢、幅度小,逐渐趋于平缓.经过 20 次干湿循环,其数值分别从 8.77 MPa 和 39.35° 劣化到 6.29 MPa 和 30.86°,劣化程度分别达到 28.28% 和 21.58%.其残余粘聚力和残余内摩擦角的劣化规律拟合公式如下:

$$c'(n) = 8.97 - 0.80\ln(n + 1), R^2 = 0.95, \quad (4)$$

$$\varphi'(n) = 40.49 - 3.67\ln(n + 1), R^2 = 0.91, \quad (5)$$

其中, c' 为残余粘聚力, φ' 为残余内摩擦角, n 为干湿循环次数.

整合前人及本研究干湿循环作用下岩石粘聚力和内摩擦角试验数据,计算其劣化度并进行对比(图 7 和图 8).结果显示,本研究与前人研究结果相似,粘聚力和内摩擦角的劣化度均随着干湿循环次数的增加而增大,增大值随着干湿循环作用次数的增加而逐渐减小.然而,由于岩石的性质不同,不同岩石粘聚力和内摩擦角劣化度的增长速率和增长幅度不同,云母石英片岩粘聚力劣化度相对其他岩石,增长速率和幅度均较小;内摩擦角劣化度初期增长速率和幅度介于砂岩和花岗岩之间,后期增长速率和幅度下降至低于其他各类岩石.

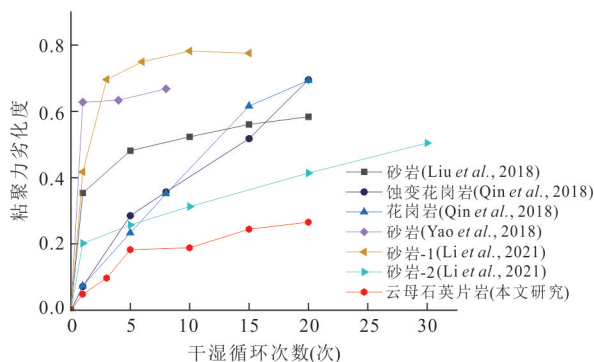


图7 干湿循环作用下不同岩石粘聚力劣化度变化规律
Fig.7 Variation of cohesion deterioration of different rocks under dry-wet cycles

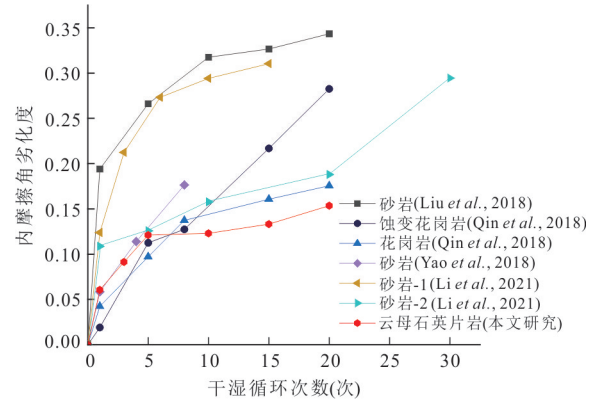


图8 干湿循环作用下不同岩石内摩擦角劣化度变化规律
Fig.8 Variation of friction angle deterioration of different rocks under dry-wet cycles

2.3 云母石英片岩试样剪切破坏面损伤特征

片岩试样在直剪试验达到峰值强度、产生完整剪切面后,仍具有残余抗剪强度,这部分抗剪强度是由剪切面的粗糙程度和表面强度提供的;继续施加剪应力,剪切面上下两部分岩体产生相对运动,造成部分剪切面的摩擦损伤,其摩擦损伤程度与残余抗剪强度相关,准确、高效地获取剪切破坏面的信息,是评价干湿循环作用下剪切面损伤特征的关键(陈娜等,2021).不同干湿循环次数作用下,云母石英片岩试样剪切破坏面呈现不同的形态,其摩擦损伤程度有所差异,为了定量描述其摩擦损伤程度,采用图像处理技术-分割方法对试样剪切破坏面照片进行处理.以0次干湿循环、9 MPa法向应力下的试样为例,具体操作步骤如下:首先,以剪切试验前云母石英片岩试样上端面作为剪切破坏面的参照面,作其灰度分布直方图,如图 9a 所示,可见其灰度值分布近似于正态分布,获得正态分布的均值 m 及标准差 σ .其次,作云母石英片岩试样剪切破坏面的灰度直方图,如图 9b 所示,可见破坏面灰度值发生了明显的变化,整体向右移动,按照分割原则,选择等于或大于灰度阈值 $m + 1.96\sigma$ 的像素部分,标定为白色,认定为剪切破坏部分,其他部分则标定为黑色(Nouailletas et al., 2017; 刘星等, 2020).

采用上述分割方法,以每组试验中法向应力为 9 MPa 时的云母石英片岩试样为例,得到 0、1、3、5、10、15、20 次干湿循环后试样剪切破坏面灰度图像的阈值分别为 161、188、158、157、144、160、140.最后,将各试样剪切破坏面灰度图转为二进制的黑白图像,即将灰度图中灰度值大于阈值的部分标定为

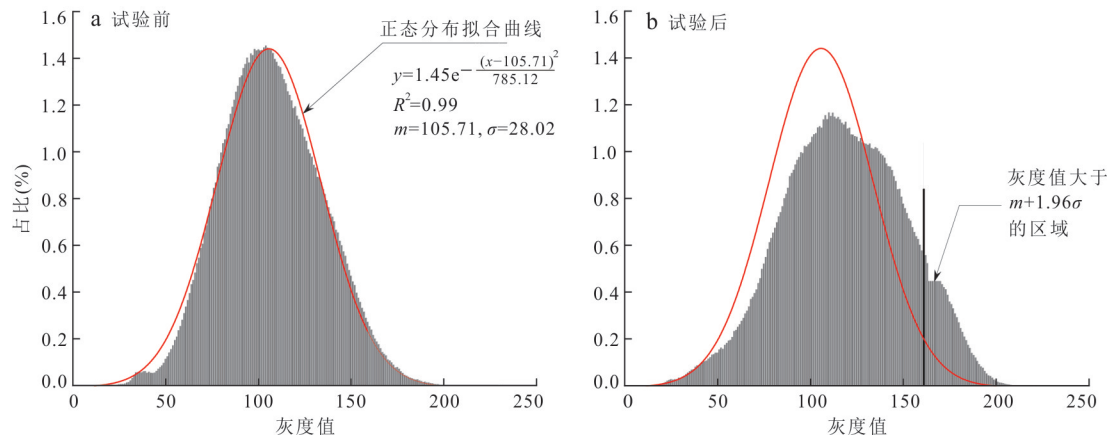


图9 直剪试验前后试样破坏面灰度值分布直方图

Fig.9 Histogram of the gray value distribution of the failure surface before and after the direct shear test

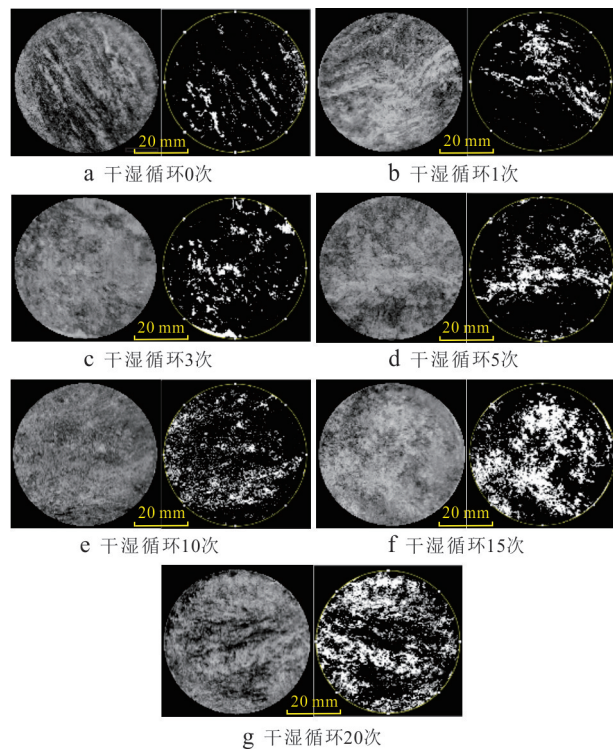


图10 试样剪切破坏面分割方法处理前后对比

Fig.10 Comparison of shear failure surface segmentation method of schist sample before and after treatment

白色,其他部分标定为黑色,处理结果如图10所示.从云母石英片岩试样剪切破坏面处理前的灰度图可以得出:干湿循环作用前期的云母石英片岩试样剪切破坏后,破坏面呈阶状特征,且破坏面上存在、伴有少量的薄片和粉末;随着干湿循环次数的增加,破坏面阶状特征逐渐不明显,薄片和粉末明显增多.从处理后二进制黑白图可以得出:试样剪切破坏面白色区域增多,黑色区域减少,白色部分为摩擦损伤

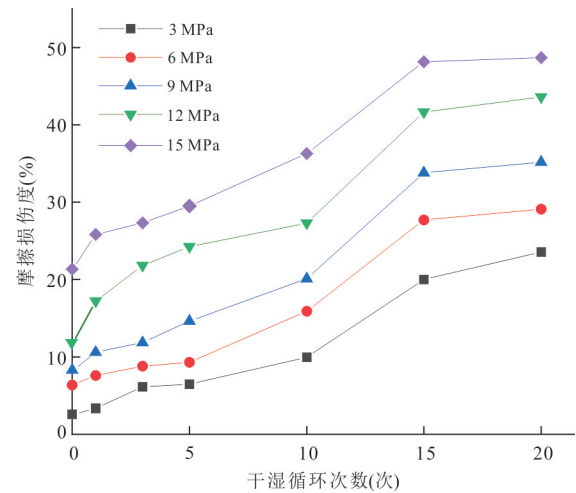


图11 干湿循环作用下试样剪切面摩擦损伤度变化曲线

Fig.11 Variation curves of shear surface friction damage of shear surface under dry-wet cycles

区域,表明随着干湿循环次数的增加,云母石英片岩试样剪切面摩擦损伤程度逐渐增大.

为定量分析剪切面的摩擦损伤程度,根据云母石英片岩试样剪切破坏面图像处理结果计算试样摩擦损伤度,即摩擦损伤区面积(灰度值大于等于阈值的面积)与总面积之比,计算结果如图11所示.对于0次干湿循环的云母石英片岩试样,3、6、9、12、15 MPa法向应力下剪切面摩擦损伤度分别为2.51%、6.39%、8.14%、11.61%、21.24%;15次循环后,不同法向应力下摩擦损伤度为20.01%、27.71%、33.80%、41.66%、48.15%;20次循环后,不同法向应力下摩擦损伤度为23.55%、29.10%、35.18%、43.60%、48.67%,剪切面摩擦损伤区域的面积随着干湿循环次数的增加而增大.在干湿循环中期,剪切面摩擦损伤

度增长较快,循环 15 次后变化趋于平缓.

以上试验结果表明,随着干湿循环次数的增加,云母石英片岩残余粘聚力和残余内摩擦角逐渐减小,剪切面摩擦损伤度逐渐增大.由于云母石英片岩的残余抗剪强度取决于剪切面的粗糙程度和矿物成分的强度,可知干湿循环作用可使得云母石英片岩矿物强度降低、结构变松散,在剪切作用过程中,剪切面上下两部分岩体相对摩擦滑动发生摩擦损伤破坏,使其阶状特征变得不明显,并产生大量的薄片和粉末.

3 云母石英片岩劣化机理

3.1 微观结构变化特征

为研究云母石英片岩在干湿循环作用过程中微观结构的变化特征和规律,在不同干湿循环次数后,对岩样分别按垂直片理面和平行片理面进行扫描电镜测试,测试结果如图 12 和图 13 所示.

由图 12a 和图 13a 可以看出,云母石英片岩片状矿物呈定向平行分布,具有明显的片状构造,也存在少量的片状矿物走向与整体走向相交以及片状矿物和粒状矿物交替夹杂分布的情况.云母石英片岩的微观结构:在平行片理方向上的片理、微裂隙极为发育且存在一定的定向性,垂直片理面的微裂隙发育较少,主要为片状矿物的边缘.

由图 12 和图 13 不同干湿循环次数下云母石英片岩 SEM 照片可以看出,随着干湿循环次数的

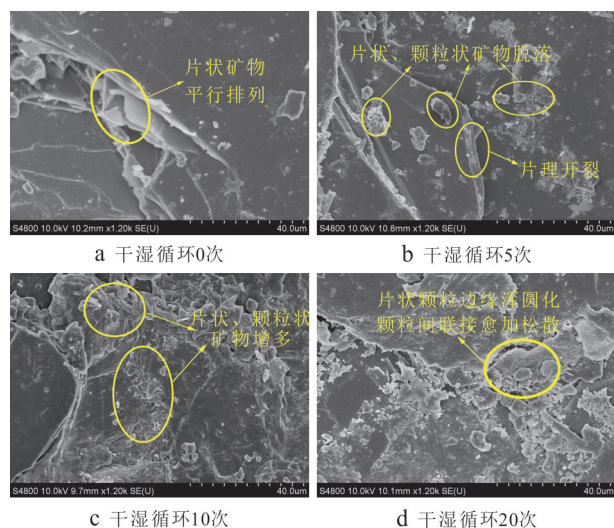


图 12 不同干湿循环作用下垂直片理 SEM 照片 (×1 200 倍)

Fig.12 SEM pictures of vertical foliation under different dry-wet cycles(×1 200 times)

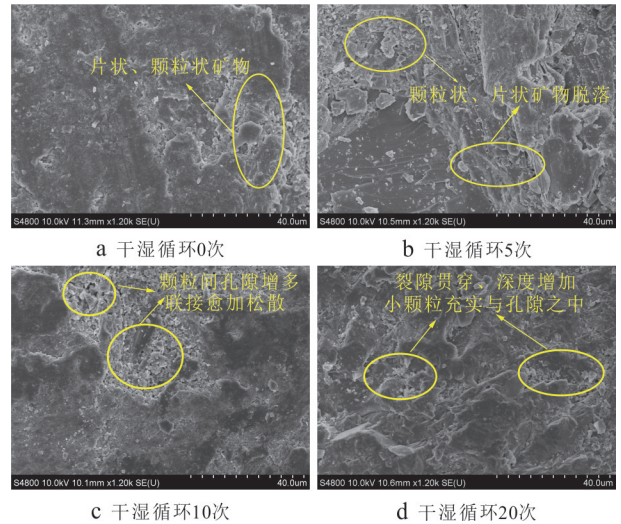


图 13 不同干湿循环作用下平行片理 SEM 照片 (×1 200 倍)

Fig.13 SEM pictures of parallel foliation under different dry-wet cycles(×1 200 times)

增加,云母石英片岩微观结构在垂直片理方向上的变化为片状颗粒剥落变多,片状颗粒的不规则边缘逐渐浑圆化、颗粒化,矿物颗粒间裂隙数量增多且逐渐扩展,颗粒的连接变得愈加松散.在平行片理方向上的变化为片理张开形成微裂隙,已有微裂隙的密度、贯穿长度、贯穿深度明显增大,粒间孔隙数量增多,粒内孔隙被打开,并逐渐贯通,小粒径颗粒也增多,并充实于孔隙中.

3.2 劣化机理

在干湿循环作用下,云母石英片岩力学性质的劣化通常是物理、化学因素综合作用的结果,根据云母石英片岩矿物成分及其排列特征,以及试样剪切破坏面特征及微观结构变化特征,得到干湿循环作用下云母石英片岩劣化过程如图 14 所示,其劣化机理具体如下:

(1)云母石英片岩主要由白云母、绿泥石、石英、钠长石、方解石、白云石和微斜长石组成,其中白云母、绿泥石等片状矿物,以及石英、长石等粒状矿物定向排列形成密集的片理面,且与片理面平行的微裂隙也较发育,为水进出岩石内部提供了良好的通道.

(2)云母石英片岩中片状矿物之间、片状矿物与粒状矿物之间具有泥质胶结作用,粒状矿物之间具有硅质胶结作用.在润湿过程中,水可以通过以上结构面进入岩石,溶解泥质胶结物和可溶性矿物,如方解石;在干燥过程中,岩石内部的水会蒸

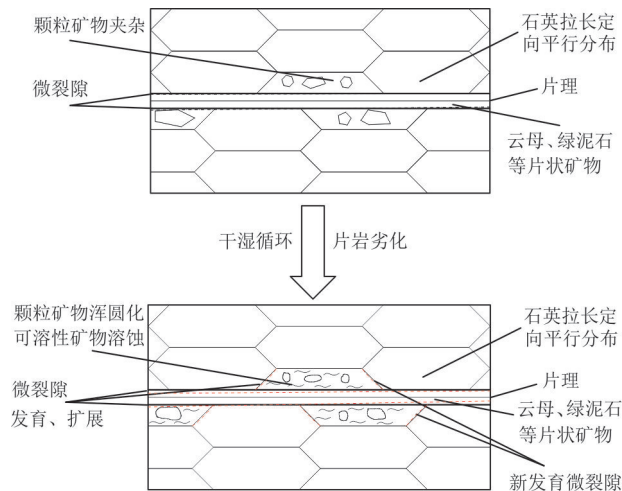


图 14 干湿循环作用下云母石英片岩劣化过程

Fig.14 Diagram of mica quartz schist deterioration mechanism under wet-dry cycles

发,将可溶性物质带到岩石表面.可溶物质的溶蚀作用可使得云母石英片岩产生新的微孔隙、微裂隙.此外,云母石英片岩中含量最高的矿物——绿泥石属于粘土矿物,具有较强的吸水软化性,其结构易受水的作用而破坏.

(3)随着干湿循环次数的增加,云母石英片岩内部可溶物质不断被带出,片理面间充填的微细岩屑、胶结物以及矿物颗粒间的胶结面积逐渐减少,微孔隙、微裂隙不断产生、扩展,片理面逐渐开裂,使得岩石结构趋于松散.在岩石结构变松散、矿物强度变低的双重影响下,云母石英片岩剪切破坏面粗糙度随着干湿循环作用变低,表面矿物颗粒粉末增多变细.粘聚力主要受矿物颗粒之间的胶结程度影响,劣化速率较快;内摩擦角主要受矿物颗粒嵌固程度和颗粒本身强度的影响,劣化速度相对较慢.

综上,干湿循环作用使得云母石英片岩片理面逐渐扩展开裂,片岩内部矿物颗粒胶结软化、岩石骨架变得松散,从而导致云母石英片岩抗剪性能逐渐劣化.

4 结论

(1)云母石英片岩的吸水率随着干湿循环次数增加呈大幅上升的趋势,且增加值随着干湿循环次数的增大而增大,当干湿循环达到 20 次时,吸水率增长幅度达 64.71%.

(2)干湿循环作用下云母石英片岩抗剪性能劣化效应明显,在干湿循环作用前期劣化速度较快、

幅度较大,后期速度减慢、幅度较低;干湿循环 20 次后,其不同法向应力下峰值剪应力劣化度为 16.27%~29.59%,粘聚力劣化度达到 26.58%,内摩擦角劣化度达到 15.36%.

(3)干湿循环作用下云母石英片岩剪切面摩擦损伤程度逐渐增大,残余粘聚力和残余内摩擦角逐渐减小;干湿循环 20 次后,残余粘聚力劣化度达到 28.28%,残余内摩擦角劣化度达到 21.58%.

(4)干湿循环作用使得云母石英片岩片理面逐渐扩展开裂,片岩内部矿物颗粒胶结软化、岩石骨架变得松散,从而导致云母石英片岩抗剪性能逐渐劣化.粘聚力主要受矿物颗粒之间的胶结程度影响,劣化速率较快,内摩擦角主要受矿物颗粒嵌固程度和颗粒本身强度的影响,劣化速度相对较慢.

致谢:感谢匿名审稿专家提出的有益建议!

References

- An, R., Kong, L. W., Li, C. S., et al., 2020. Strength Attenuation and Microstructure Damage of Granite Residual Soils under Hot and Rainy Weather. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(9): 1902–1911 (in Chinese with English abstract).
- Chen, N., Cai, X. M., Xia, J. W., et al., 2021. Intelligent Interpretation of Rock Mass Discontinuity Based on Three-Dimensional Laser Point Cloud. *Earth Science*, 46(7): 2351–2361 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. X., Gong, Y. P., 2019. Features of Shear Strength Parameters Reflecting Damage to Rock Caused by Water Invasion-Loss Cycles. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(3): 1919–1929. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0733-2>
- Deng, H. F., Zhou, M. L., Li, J. L., et al., 2016. Mechanical Properties Deteriorating Change Rule Research of Red-Layer Soft Rock under Water-Rock Interaction. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 35(S2): 3481–3491 (in Chinese with English abstract).
- Kang, J. T., Wu, Q., Tang, H. M., et al., 2019. Strength Degradation Mechanism of Soft and Hard Interbedded Rock Masses of Badong Formation Caused by Rock/Discontinuity Degradation. *Earth Science*, 44(11): 3950–3960 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. D., Meng, J., Xiang, L. Y., et al., 2023. Multi-Scale Evolution Mechanism of Sandstone Structure in Baihetan Reservoir Head Region. *Earth Science*, 48(12): 4658–4667 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Peng, K., Peng, J., et al., 2021. Effect of Cyclic

- Wetting-Drying Treatment on Strength and Failure Behavior of Two Quartz-Rich Sandstones under Direct Shear. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(11): 5953–5960. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02583-z>
- Liu, T., 2015. Experimental Study on Mechanical Properties of Mica Schist under the Action of Wetting-Drying Cycle. *Subgrade Engineering*, (4): 67–71 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Tang, Z. C., Li, L., et al., 2020. Experimental Study on Shear Properties of Red Sandstone Joints after Cyclic Wetting-Drying Treatment. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(S2): 3316–3325 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. R., Jin, M. H., Li, D. L., et al., 2018. Strength Deterioration of a Shaly Sandstone under Dry-Wet Cycles: A Case Study from the Three Gorges Reservoir in China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4): 1607–1621. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1107-3>
- Liu, X. R., Wang, Z. J., Fu, Y., et al., 2016. Research on Nondestructive Testing Parameters' Scale Effect of Sandstone of Different Moisture Contents. *Rock and Soil Mechanics*, 37(S1): 192–200 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. R., Wang, Z. J., Fu, Y., et al., 2017. Strength and Failure Criterion of Argillaceous Sandstone under Dry-Wet Cycles. *Rock and Soil Mechanics*, 38(12): 3395–3401 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. X., Li, Y., Wang, W. W., et al., 2022. Research on Mechanical Properties and Strength Criterion of Carbonaceous Shale with Pre-Existing Fissures under Drying-Wetting Cycles. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(2): 228–239 (in Chinese with English abstract).
- Nouailletas, O., Perlot, C., Rivard, P., et al., 2017. Impact of Acid Attack on the Shear Behaviour of a Carbonate Rock Joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(6): 1439–1451. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1182-6>
- Özbek, A., 2014. Investigation of the Effects of Wetting-Drying and Freezing-Thawing Cycles on Some Physical and Mechanical Properties of Selected Ignimbrites. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2): 595–609. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0519-y>
- Qin, Z., Chen, X. X., Fu, H. L., 2018. Damage Features of Altered Rock Subjected to Drying-Wetting Cycles. *Advances in Civil Engineering*, 2018: 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/5170832>
- Wang, C., Pei, W. S., Zhang, M. Y., et al., 2021. Multi-Scale Experimental Investigations on the Deterioration Mechanism of Sandstone under Wetting-Drying Cycles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(1): 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02257-2>
- Xie, K. N., Jiang, D. Y., Sun, Z. G., et al., 2018. NMR, MRI and AE Statistical Study of Damage Due to a Low Number of Wetting-Drying Cycles in Sandstone from the Three Gorges Reservoir Area. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(11): 3625–3634. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1562-6>
- Yao, W. M., Li, C. D., Zhan, H. B., et al., 2020. Multi-scale Study of Physical and Mechanical Properties of Sandstone in Three Gorges Reservoir Region Subjected to Cyclic Wetting-Drying of Yangtze River Water. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(5): 2215–2231. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-02037-7>
- Yin, X. M., Yan, E. C., Wang, L. N., et al., 2020. Anisotropy of Quartz Mica Schist Based on Quantitative Extraction of Fabric Information. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(5): 2439–2456. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01699-5>
- Yuan, W., Liu, X. R., Fu, Y., 2019. Chemical Thermodynamics and Chemical Kinetics Analysis of Sandstone Dissolution under the Action of Dry-Wet Cycles in Acid and Alkaline Environments. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2): 793–801. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1162-9>
- Zhang, Z. H., Huang, X., Cui, Q., 2017. Experimental Study on Deterioration of the Tensile Strength of Red Sandstone during the Operation of Reservoir. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36(11): 2731–2740 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Yang, J., Zhang, D. F., et al., 2017. Effects of Wetting and Cyclic Wetting-Drying on Tensile Strength of Sandstone with a Low Clay Mineral Content. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(2): 485–491. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-1087-9>
- Zhou, D. H., Zhai, Q. L., Liu, T., et al., 2013. Study on Deformation Mode and Failure Mechanism of Schist Slope along Highway in Northwest Hubei. *Subgrade Engineering*, (4): 29–33 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

安然, 孔令伟, 黎澄生, 等, 2020. 炎热多雨气候下花岗岩残

- 积土的强度衰减与微结构损伤规律. 岩石力学与工程学报, 39(9): 1902—1911.
- 陈娜, 蔡小明, 夏金梧, 等, 2021. 基于三维激光点云技术的岩体结构面智能解译. 地球科学, 46(7): 2351—2361.
- 邓华锋, 周美玲, 李建林, 等, 2016. 水-岩作用下红层软岩力学特性劣化规律研究. 岩石力学与工程学报, 35(S2): 3481—3491.
- 亢金涛, 吴琼, 唐辉明, 等, 2019. 岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制. 地球科学, 44(11): 3950—3960.
- 李长冬, 孟杰, 项林语, 等, 2023. 白鹤滩库首区砂岩结构多尺度演变机制. 地球科学, 48(12): 4658—4667.
- 刘廷, 2015. 干湿循环作用下云母片岩力学特性试验研究. 路基工程, (4): 67—71.
- 刘星, 唐志成, 李璐, 等, 2020. 循环干湿处理后红砂岩节理的剪切性质试验研究. 岩石力学与工程学报, 39(S2): 3316—3325.
- 刘新荣, 王子娟, 傅晏, 等, 2016. 不同含水率砂岩无损检测参数的尺度效应研究. 岩土力学, 37(S1): 192—200.
- 刘新荣, 王子娟, 傅晏, 等, 2017. 考虑干湿循环作用泥质砂岩的强度与破坏准则研究. 岩土力学, 38(12): 3395—3401.
- 刘新喜, 李玉, 王玮玮, 等, 2022. 干湿循环作用下预制裂隙炭质页岩力学特性及强度准则研究. 岩石力学与工程学报, 41(2): 228—239.
- 张振华, 黄翔, 崔强, 2017. 水库运行期岸坡消落带红砂岩抗拉强度劣化机制. 岩石力学与工程学报, 36(11): 2731—2740.
- 周大华, 翟全礼, 刘廷, 等, 2013. 鄂西北地区公路片岩边坡变形破坏模式及失稳机制研究. 路基工程, (4): 29—33.