

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.04.018

干湿循环作用下花岗岩残积土强度特性及其微观结构

潘生贵^{1,2}, 陈志波^{3,4}, 韦毅^{3,4}

(1. 华东勘测设计院(福建)有限公司, 福建 福州 350007;

2. 福州市海洋岩土工程勘察行业技术创新中心, 福建 福州 350007;

3. 福州大学 紫金地质与矿业学院岩土与地质工程系, 福建 福州 350116;

4. 福建省智能环境岩土工程闽台科技合作基地, 福建 福州 350116)

摘要: 为了探究干湿循环对花岗岩残积土强度特性及微观结构的影响,以福建地区典型花岗岩残积土为研究对象,开展干湿循环作用下土体直剪试验,对不同干湿循环次数下花岗岩残积土的强度特性进行分析;并开展扫描电镜(SEM)试验,对干湿循环作用下花岗岩残积土的微观结构变化进行探讨。试验结果表明:花岗岩残积土的内摩擦角随干湿循环次数的增加整体略有减小,但变化较小;而黏聚力随着干湿循环次数增加前期迅速减小,随后减小趋势减缓且逐渐趋于稳定。基于试验数据拟合,得到花岗岩残积土黏聚力及抗剪强度与干湿循环次数之间的函数关系式。干湿循环作用下,花岗岩残积土微观结构变化主要表现为孔隙率增大,小孔隙逐渐贯通形成大孔隙,从而导致土体抗剪强度降低。

关键词: 干湿循环;花岗岩残积土;强度特性;微观结构

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)04—0150—05

Strength Property and Microstructure of Granite Residual Soil Under Drying-wetting Cycles

PAN Shenggui^{1,2}, CHEN Zhibo^{3,4}, WEI Yi^{3,4}

(1. Huadong Engineering (Fujian) Corporation Limited, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. Fuzhou Marine Geotechnical Engineering Survey Industry Technology Innovation Center, Fuzhou, Fujian 350007, China;

3. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University,

Fuzhou, Fujian 350116, China; 4. Fujian-Taiwan Science and Technology Cooperation Base of Fujian Province on

Intelligent Geoenvironmental Engineering, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: In order to investigate the effects of drying-wetting cycle on the strength property and the microstructure of the granite residual soil, which regarded as one typical soil in Fujian area. The strength of the granite residual soil under different drying-wetting cycles were studied by a series of straight shear tests. The microstructure changes under different drying-wetting cycles were also explored by scanning electron microscopy (SEM) tests. The experimental results show that the internal friction angle of granite residual soil decreases slightly with the increasing of the number of drying-wetting cycles, but the change is small. While, the cohesion of soil decreases rapidly with the increasing of the number of drying-wetting cycles in the early stage, and then slows down and tends to be stable. Based on the test data, the relationship between cohesion and shear strength of granite residual soil and the number of drying-wetting cycles was established. Under the action of wet and dry cycles, the microstructural changes of granite residual soil are mainly manifested in the increase of porosity, then the small pores were connected to form large pores, which leads to the decrease of the shear strength.

Keywords: drying-wetting cycle; granite residual soil; strength property; microstructure

收稿日期: 2025-04-03

修稿日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278335); 福建省自然资源厅科技创新项目(KY-070000-04-2022-021、KY-070000-04-2022-026); 华东勘测设计院(福建)有限公司科研项目(FH2018-KY003、FH2019-KY006)

作者简介: 潘生贵(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察及测试等方面的技术工作。E-mail: pan_sg@ecidi.com

通讯作者: 陈志波(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质的教学与科研工作。E-mail: czb@fzu.edu.cn

花岗岩残积土作为一种特殊性土体,在福建及东南沿海区域广泛分布,并多见于边坡治理工程。边坡浅层土体常常裸露在外,受气候影响,边坡土体经历雨水浸泡和日晒干燥的循环作用,使得土体反复处于干湿循环过程,导致其力学性质发生严重劣化,从而影响边坡稳定性。因此,明确花岗岩残积土在干湿循环作用下的强度特性及影响机理,对明确其工程特性及边坡稳定设计具有重要意义。

花岗岩残积土具有很强的结构性,原状土与扰动土其力学性质将存在很大差异,因此,许多学者研究了原状土与重塑土花岗岩残积土的强度特征,也分析了室内试验与原位测试下其力学特征差异。邵嘉波等^[1]和马勤国等^[2]的研究均表明,原位试样的黏聚力和内摩擦角均比室内重塑试样大很多。而陈亚洲^[3]对赣南花岗岩残积土的研究表明,原状土抗剪强度指标大于重塑土,但内摩擦角较重塑样略小。因此,原位大型直剪试验更适宜于获取花岗岩残积土的抗剪强度指标^[1,4]。

许多学者研究了含水率对花岗岩残积土强度的影响。李杨波等^[5]对江西省赣州市花岗岩残积土的三轴试验研究发现,花岗岩残积土抗剪强度随着含水率的升高而降低。张鹏超^[6]对另一花岗岩残积土的直剪试验却发现,随含水率增大,其黏聚力和内摩擦角均呈线性减小。刘飞禹等^[7]对广州花岗岩残积土开展的循环直剪试验中发现,峰值剪切强度和残余剪切强度均随含水率的升高先增大后减小。柳柳等^[8]对广东省五华地区花岗岩残积土的直剪试验成果表明,含水率增加导致土体抗剪强度衰减;相较于原状土,重塑土含水率增加引起的抗剪强度指标衰减幅度更大。

部分学者分析了花岗岩残积土的微细观结构。张宏虎等^[9]探讨了含砾花岗岩残积土的细观剪切特性。黎澄生等^[10]对三轴试验剪切带上花岗岩残积土的细观结构进行了分析,并明确了其损伤规律。周宇等^[11]研究了干湿循环下花岗岩残积土的微观结构变化,发现随着干湿循环次数增加,其原有层叠结构遭到破坏,平面孔隙率增大,结构趋向疏松。

干湿循环对土体的强度有很大影响。张鹏超^[6]研究表明,随着干湿循环次数的增加,黏聚力呈指数型函数降低,而对内摩擦角的影响不大;强度衰减曲线符合“S”型曲线,强度损失主要集中于前5次干湿循环。安然等^[12]的研究也表明,随着循环次数增加,花岗岩残积土的有效黏聚力和有效内摩擦角逐渐减小,且有效黏聚力的衰减幅度明显更大。

但是,康馨等^[13]对深圳市南山区花岗岩残积土的三轴固结不排水剪切试验研究却表明,随着干湿循环次数增加,花岗岩残积土有效黏聚力不断减小,而有效内摩擦角则不断增大。

陈汪洋等^[14]研究表明,随着干湿循环次数增加,高液限花岗岩残积土抗剪强度参数整体呈现减小的趋势,经6次干湿循环作用后,基本达到稳定。于佳静等^[15]的研究也表明,花岗岩残积土的抗剪强度在3~5次干湿循环后趋于稳定。丁庆峰等^[16]研究表明,随着干湿循环次数的增加,不同饱和度下花岗岩残积土的黏聚力均呈现较明显的减小趋势,其摩擦角则在一定范围内浮动改变,但大致稳定。对于用微生物改良后的花岗岩残积土,土体在干湿循环作用下呈现前期抗剪强度指标降低较快而后逐渐趋于稳定的规律^[17]。

由前人研究成果可知,在不同含水率及干湿循环作用下,土体强度变形及其微观结构均产生重大变化,而干湿循环作用对福建地区广泛分布的花岗岩残积土强度和微观结构特征的影响机制,尚需深入研究。因此,本文针对花岗岩残积土,通过室内直剪试验,对不同干湿循环次数下的花岗岩残积土强度特性进行研究,同时通过扫描电镜(SEM)试验,对不同干湿循环次数下的花岗岩残积土微观结构演变进行探究,并分析强度与微观结构变化的联系。

1 试验材料与方法

1.1 试验土样

本试验采用福州某边坡治理工程出露的花岗岩残积土作为试验用土,其基本物理性质如表1所示,土样粒径分布如表2所示,测试方法参照《土工试验方法标准》^[18](GB/T 50123—2019)。

表1 土样的物理性质指标

比重	天然密度 /(g·cm ⁻³)	天然含水率 /%	天然 孔隙比	液限 /%	塑限 /%
2.63	1.835	20.4	0.725	45.2	30.5

表2 土样粒径分布

粒径 /mm	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.075	<0.075
含量/%	3.2	24.4	6.4	8.5	3.8	13.3	40.4

1.2 试验方法

本试验主要在室内模拟室外自然条件下由于气候原因引起的干湿交替作用,参照大量残积土边坡

工程统计数据^[19],发现浅层残积土含水率最低值约为 12%,最高值为饱和状态。因此,将试样含水率控制在 12% 至饱和状态进行干湿循环。试验分为 2 组,其试样分别为原状样和重塑样,对其进行多次干湿循环。试验过程中采用烘箱脱湿的方法,由于福建地区最高温度可达 40℃,为此,试样烘干脱湿温度定为 40℃,增湿采用抽气饱和法。脱湿过程采用天平称重来控制土样含水率,当达到所需含水率,将土样用保鲜膜密封养护 24 h,以让试样内部水分均匀。之后进行直剪试验,获得不同干湿循环次数下花岗岩残积土的抗剪强度指标,并分析其随循环次数的变化规律。

为了研究干湿循环对花岗岩残积土微观结构的影响,对干湿循环后的花岗岩残积土进行扫描电镜测试。扫描电镜试验前,先对样品进行冷冻干燥和喷金处理。

2 试验结果与分析

2.1 干湿循环对花岗岩残积土强度特性影响

根据花岗岩残积土直剪试验结果,可整理得到不同干湿循环次数 N 作用下原状样、重塑样的抗剪强度(如图 1、图 2 所示),整理得到黏聚力和内摩擦角随干湿循环次数 N 的变化规律分别如图 3、图 4 所示。

由图 1、图 2 可以看出,无论是原状样或是重塑样,总体而言,相同竖向压力下,干湿循环次数 N 越小,试样的抗剪强度值越大,即干湿循环次数少的试样其抗剪强度线位于上方。由图 3、图 4 可以看出,无论是原状样或是重塑样,在干湿循环效应下,其抗剪强度指标变化规律基本相同,其中,黏聚力在前 2 次干湿循环作用下均有较大幅度的衰减,之后黏聚力变化幅度减小,在 4~6 次干湿循环后,逐渐趋于稳定,对比原状样,重塑样的衰减幅度更大,衰减速率更快;而内摩擦角受干湿循环作用变化不明显,大体上趋于某个稳定值。

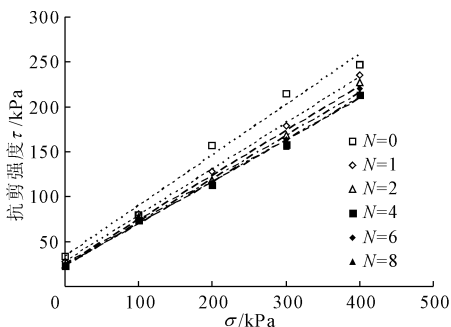


图 1 不同干湿循环次数下原状样抗剪强度

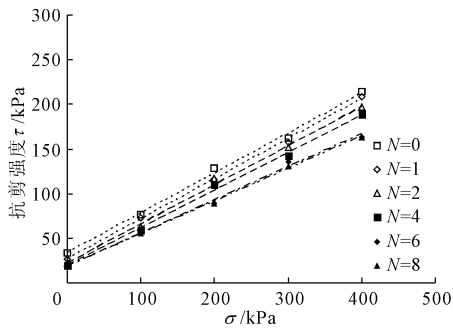


图 2 不同干湿循环次数下重塑样抗剪强度

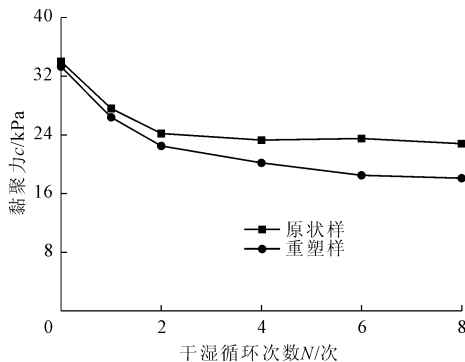


图 3 干湿循环次数与黏聚力关系

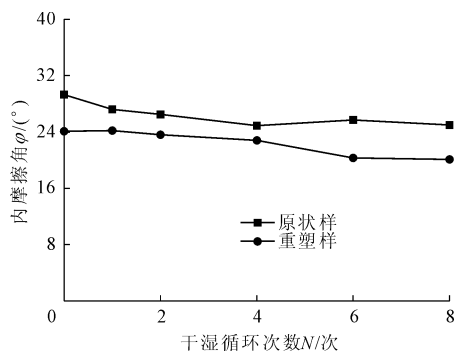


图 4 干湿循环次数与内摩擦角关系

对试验数据采用无量纲归一化处理,对黏聚力 c 与干湿循环次数 N 拟合可得到如下函数关系:

$$c = Ae^{-BN} + C \quad (1)$$

式中: c 为黏聚力; N 为循环次数; A 、 B 、 C 为参数。

原状样的拟合曲线如图 5 所示,重塑样与原状样类似。

对于原状样:

$$c = 0.98e^{-0.96N} + 1.02 \quad (2)$$

相关系数 $R^2 = 0.990$ 。

对于重塑样:

$$c = 0.99e^{-0.60N} + 1.01 \quad (3)$$

相关系数 $R^2 = 0.995$ 。

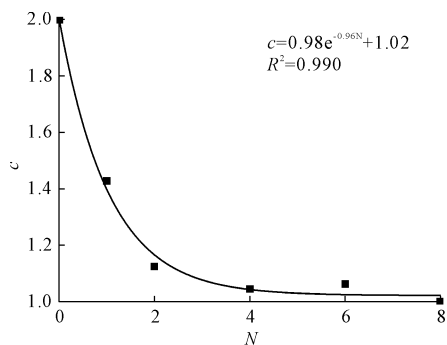


图 5 原状样 c 与 N 的关系曲线

无论对于原状样或是重塑样,拟合公式相关系数都大于等于 0.99,认为此函数可以较好的拟合黏聚力 c 与干湿循环次数 N 之间的关系。

因为内摩擦角 φ 受干湿循环次数 N 影响不大,故可以在分析中,将内摩擦角取平均值 φ_0 ,即可得到抗剪强度与干湿循环次数关系的经验公式:

$$\tau = \sigma \tan \varphi_0 + ae^{-bN} + p \quad (4)$$

上述公式量化了福州地区花岗岩残积土的抗剪强度随干湿循环次数的变化趋势。

2.2 花岗岩残积土微观结构变化

图 6 为不同干湿循环次数下花岗岩残积土重塑样 SEM 图。由图 6 可知,随着干湿循环次数逐渐增加,在水-岩物理、化学作用下,胶结物质水解,花岗

岩残积土的松散颗粒越来越多,孔隙增多、变大,并不断扩展、贯通,形成裂隙,宏观上即表现为黏聚力 c 的减小和强度的降低。

随干湿循环次数增加,总体上,花岗岩残积土微观结构变化分为 3 个阶段^[20]:

(1) 整齐致密状。如图 6(a)所示,在干燥状态时,花岗岩残积土以扁平状颗粒和粒状颗粒为主,轮廓清晰、大小均匀、排列紧密。孔隙均为细小孔隙,分布零星,独立无联通。

(2) 多孔团絮状。如图 6(c)所示,经 2 次干湿循环作用后,花岗岩残积土结构发生明显变化,颗粒形态向片状转变,且细小孔隙增加。 N 增加到 4 次时,如图 6(d)所示,初始微裂纹开始出现,孔隙变大且数量增多。

(3) 开裂紊流状。如图 6(f)所示,当 N 增加到 8 次时,部分细孔隙贯通,形成大孔隙,试样表面产生贯通裂纹。对比干燥状态,此时花岗岩残积土微观结构已发生彻底的改变。

2.3 花岗岩残积土微观结构参数

土体微结构特征参数包括土颗粒的孔隙率、孔隙数、概率熵、分形维数等一系列参数,利用南京大学自主开发的图像识别与分析系统(PCAS),对花岗岩残积土的 SEM 扫描电镜图像进行了定量分析,结果如表 3 所示。

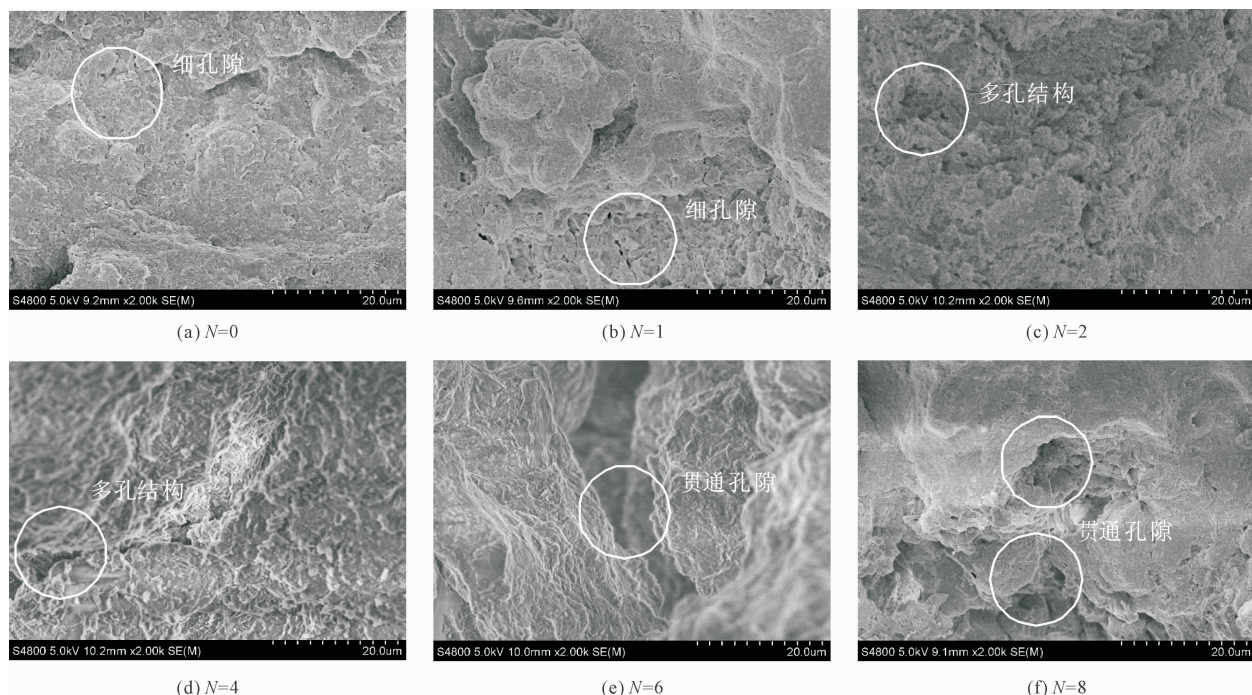


图 6 不同干湿循环次数下花岗岩残积土 SEM 图(2000x)

表 3 不同干湿循环次数下花岗岩残积土微观结构参数

N/次	孔隙率/%	孔隙个数	概率熵	分形维数
0	6.73	44	0.8725	1.1389
1	16.70	694	0.9913	1.6389
2	17.98	1071	0.9505	1.2396
4	18.43	646	0.9893	1.2270
6	22.44	577	0.9624	1.2228
8	25.15	550	0.9869	1.3736

由表 3 可以看到,随着干湿循环次数增加,花岗岩残积土土体颗粒间的孔隙率逐渐增大,且孔隙个数在经过 1 次干湿循环后,有一个大幅度的增长,且不同干湿循环次数下概率熵都接近于 1,说明花岗岩残积土的孔隙定向性很差。孔隙率变大,意味着花岗岩残积土的劣化程度越高,残积土结构遭到破碎,使颗粒之间连接减弱,黏聚力降低。黏聚力随着土颗粒的排列形式不同而有差异,而颗粒定向概率熵就是能够反映土颗粒排列的定向性的参数,在干湿循环作用下,土体收缩、膨胀,循环反复,削弱了颗粒之间的范德华力,导致其颗粒定向性变差,黏聚力同样会降低。黏聚力中的相邻土颗粒之间的引力与土粒间的距离有关,而分形维数是能够间接反映土颗粒间距离的均一化水平的参数。

综上,干湿循环下,花岗岩残积土宏观力学特性表现为:干湿循环次数增加,土体孔隙率增大,土体颗粒间的孔隙增多,但孔隙个数减少,土体结构发生大变化,土体抗剪强度降低,其中,黏聚力大幅降低、内摩擦角也有所减小。

2.4 干湿循环下花岗岩残积土劣化机理

根据以上的试验结果可知,随着干湿循环次数增加,花岗岩残积土黏聚力降低,内摩擦角略有减小但变化很小。花岗岩残积土在干燥脱水时,会导致含水率快速降低,土体孔隙不均匀收缩,产生微裂隙,孔隙逐渐增多,结构进一步破坏,使颗粒间连接减弱;而在饱和增湿过程中,土体吸水发生膨胀,水分子沿着裂隙运动,不断加长、加宽了裂隙,削弱了颗粒之间不可逆的范德华力,使土中分散的细粒含量增加,颗粒之间的胶结作用减弱,随着循环次数的增加,导致劣化进一步发展。因此,干湿循环作用下,花岗岩残积土强度变化是一个劣化不断累积的演变过程,且这一过程是不可逆的。

3 结 论

(1) 无论是原状土或是重塑土,随着干湿循环次数增加,花岗岩残积土黏聚力逐渐降低,而且前期

衰减明显,后期逐渐减缓,直至趋于稳定;而在干湿循环作用下,花岗岩残积土内摩擦角仅略微减小,但变化很小。

(2) 花岗岩残积土黏聚力与干湿循环次数的关系可以用指数函数来拟合,拟合相关系数大于等于 0.99,在此基础上,得到了福建地区干湿循环下花岗岩残积土抗剪强度经验公式。

(3) 干湿循环作用下,花岗岩残积土微观结构先后变化为整齐致密状、多孔团絮状和开裂紊流状 3 个阶段。随着干湿循环次数增加,土体孔隙率不断增大,但孔隙个数先增加后减少,说明形成了贯通大孔隙,土体结构发生较大变化,导致土体抗剪强度降低。

参考文献:

- [1] 邵嘉波,宋常军,徐凤银,等. 花岗岩残积土的室内外剪切特性对比[J]. 公路交通科技,2023,40(S1):192-198.
- [2] 马勤国,郭皓公,罗晓晓. 非饱和花岗岩残积土的剪切特性与抗剪强度分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(11):55-68.
- [3] 陈亚洲,简文星,王吉庆. 赣南花岗岩残积土物理力学特性的实验研究[J]. 科学技术与工程,2018,18(4):115-120.
- [4] 胡 屏,陈志波,罗 旋,等. 含粗颗粒花岗岩残积土大型直剪试验研究[J]. 自然灾害学报,2019,28(6):119-126.
- [5] 李扬波,李如玥,石 熊,等. 花岗岩残积土抗剪强度与微观结构特征[J]. 华侨大学学报,2024,45(3):332-338.
- [6] 张鹏超. 干湿循环作用下花岗岩残积土性能劣化及边坡稳定性分析[J]. 工程勘察,2020,48(9):19-23.
- [7] 刘飞禹,梁崇旭,王 军,等. 不同含水率下花岗岩残积土循环剪切特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2023,42(8):2048-2057.
- [8] 柳 柳,李 园,施红艺. 花岗岩残积土微观结构及含水率对抗剪强度影响研究[J]. 铁道勘察,2025,51(3):12-21.
- [9] 张宏虎,白 伟,孙明祥,等. 闽东地区含砾花岗岩残积土的细观剪切特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(2):48-53.
- [10] 黎澄生,孔令伟,舒荣军,等. 花岗岩残积土剪切带上的细观结构损伤规律[J]. 岩土力学,2023,44(11):3203-3212.
- [11] 周 宇,陈东霞,于佳静,等. 干湿循环作用下花岗岩残积土的崩解试验与微观机理研究[J]. 长江科学院院报,2023,40(1):153-160.

- 征及演化规律对比研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6):1074-1082.
- [5] 陈 栋, 王恩元, 李 楠, 等. 石膏和砂岩试样损伤破裂及声发射时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7):1902-1909.
- [6] 李东杰, 王帅旗, 曹 阔. 单轴作用下岩石的破坏行为及声发射响应特征研究[J]. 煤, 2025, 34(1):27-31, 37.
- [7] Meng Fanzhen, Zhou Hui, Wang Zaiquan, et al. Experimental study on the prediction of rockburst hazards induced by dynamic structural plane shearing in deeply buried hard rock tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86:210-223.
- [8] 安树正, 李庶林, 熊璐伟, 等. 岩石峰值强度前声发射信息多指标及分形维值分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2024, 63(4):753-762.
- [9] 苗金丽, 何满潮, 李德建, 等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8):1593-1603.
- [10] Zhang Yan, Feng Xiating, Yang Chengxiang, et al. Fracturing evolution analysis of Beishan granite under true triaxial compression based on acoustic emission and strain energy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 117:150-161.
- [11] 李安强, 张 茹, 艾 婷, 等. 花岗岩单轴压缩全过程声发射时空演化行为及破坏前兆研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S2):306-311.
- [12] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2):3383-3390.
- [13] 赵慧子, 梁正召, 刘祥鑫. 三点弯曲试验条件下的岩石声发射演化特征[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2):6-12.
- [14] 赵 菲, 孟世卓, 刘冬桥, 等. 基于声发射信号特征的花岗岩岩爆破破坏前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(11):2669-2686.
- [15] 牛 勇. 裂隙岩石破裂过程声发射表征及失稳预警研究[D]. 重庆大学, 2021.
- [16] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34:185-188.
- [17] 张黎明, 马绍琼, 任明远, 等. 不同围压下岩石破坏过程的声发射频率及 b 值特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10):2057-2063.
- [18] 赵小平, 陈淑芬. 基于声发射振幅分布的裂隙岩体破坏演化过程[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1):3012-3017.

(上接第 154 页)

- [12] 安 然, 孔令伟, 黎澄生, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9):1902-1911.
- [13] 康 馨, 赵士成, 刘 鹏. 干湿循环下花岗岩残积土胶结物溶蚀-微结构演化规律与力学行为[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(1):159-169.
- [14] 陈汪洋, 刘伟明, 胡林杰. 干湿循环对高液限花岗岩残积土抗剪强度参数的影响[J]. 湖南交通科技, 2023, 492(3):22-25.
- [15] 于佳静, 陈东霞, 王 晖, 等. 干湿循环下花岗岩残积土抗剪强度及边坡稳定性分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(4):614-619.
- [16] 丁庆峰, 陈贤颖, 林沛元, 等. 干湿循环下花岗岩残积土抗剪强度试验研究[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(10):5-9, 72.
- [17] 朱文羲, 邓华锋, 李建林, 等. 干湿循环作用下微生物改良花岗岩残积土劣化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(2):482-491.
- [18] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [19] 简文彬, 吴振祥. 地质灾害及其防治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [20] 刘新荣, 李栋梁, 张 梁, 等. 干湿循环对泥质砂岩力学特性及其微细观结构影响研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7):1291-1300.