文章编号:1674-2974(2024)01-0126-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024012

湿热力作用下粉砂质泥岩开裂特性研究

曾铃[2],郭雨[2],查焕奕[2],高乾丰[3†],黎繁[2],卞汉兵[1]
[1. 桥梁工程安全控制教育部重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;
2. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;
3. 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114]

摘 要:为探究湿热力作用下粉砂质泥岩的开裂特性,开展裂隙演化试验,得到湿热力单因素及多因素耦合循环作用下粉砂质泥岩的裂隙演化规律,同时利用X射线衍射、扫描电镜研究其微观结构变化特征,分析宏观和微观试验结果关联性,揭示湿热力作用下粉砂质泥岩裂隙扩展机制.研究结果表明:粉砂质泥岩裂隙发育表现为增长-平缓趋势;在单因素循环作用中,湿度循环(浸水~烘干)最易造成粉砂质泥岩开裂,温度循环(5~60 ℃)次之,荷载循环(0~50 kPa)最弱;在多因素耦合循环作用中,裂隙发育程度排序为:湿热力>湿热>湿力>热力,验证了湿度循环致裂性最强的结论.湿热力耦合循环作用15次后裂隙率达0.92%,裂隙条数增至30条,平均长度延伸至60.58 mm,而平均宽度稳定在0.47 mm左右.孔隙率与裂隙率的灰关联度最大,为0.813,即微观结构变化中孔隙发育与裂隙扩展的关联程度最大.湿热力耦合循环作用中,湿度循环引起黏土矿物晶层间距变化,导致颗粒破碎、孔隙扩张形成微裂隙,温度循环使试样产生差异性热应力、水分分布,促使微裂隙发育贯通,荷载作用增加尖端应力,最终导致裂隙网络形成.

关键词:边坡工程;粉砂质泥岩;湿热力作用;裂隙发育;微观结构
中图分类号:U416.1 **文献标志码**:A

Study on Fracturing Characteristics of Silty Mudstone under Moisture-thermo-mechanical Loading Conditions

ZENG Ling[2], GUO Yu[2], ZHA Huanyi[2], GAO Qianfeng[3†], LI Fan[2], BIAN Hanbing[1]
[1. Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control by Department of Education (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China;
2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
3. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China]

Abstract: To investigate the fracture characteristics of silty mudstone under moisture-thermo-mechanical

* **收稿日期**:2022-12-02
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078066, 52078067, 52378440), National Natural Science Foundation of China(52078066, 52078067, 52378440);湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(2023JJ10045), Natural Science Foundation of Hunan Province Outstanding Youth Fund Project (2023JJ10045);长沙市杰出创新青年培养计划(kq2305023), Outstanding Innovative Youth Training Program of Changsha City(kq2305023);桥梁工程安全控制教育部重点实验室(长沙理工大学)开放基金资助项目(15KB01), Open Fund of Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control by Department of Education (Changsha University of Science & Technology)(15KB01)
作者简介:曾铃(1986—),男,重庆江津人,长沙理工大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail: qianfeng.gao@csust.edu.cn

conditions, fracture evolution tests were carried out, and the fracture development of silty mudstone under single-factor cycles and multi-factor coupling cycles was obtained. Meanwhile, X-ray diffraction and scanning electron microscope were employed to examine the microstructural change of silty mudstone. By combining the correlation of macro and micro test results, the crack propagation mechanism of silty mudstone under moisture-thermo-mechanical conditions was revealed. The results show that the fracture development of silty mudstone under moisture-thermo-mechanical conditions generally exhibits a growth-gentle trend. Under single-factor cycles, humidity cycles (soaking-drying) are most likely to cause fracturing of silty mudstone, followed by temperature cycles (5~60 °C) and mechanical cycles (0~50 kPa). Under multi-factor coupling cycles, their order to cause fracturing is moisture-thermo-mechanical cycles, moisture-thermo cycles, moisture-mechanical cycles, and thermo-mechanical cycles, which verifies the finding that humidity cycles are the dominant factor in causing fractures. After 15 moisture-thermo-mechanical cycles, the fracture rate can reach 0.92%, the number of fractures increases up to 30, the average fracture length extends to 60.58 mm, and the average fracture width is stable at about 0.47 mm. The gray correlation between the porosity and fracture rate is the largest, which is 0.813, indicating that the correlation between pore development and fracture expansion is the greatest in microstructure changes. Under moisture-thermo-mechanical conditions, humidity cycles cause the interlayer spacing changes of clay minerals, resulting in particle breakages and pores expansion to form microcracks. The temperature cycle produces differential thermal stress and water distribution in silty mudstone, which promotes the development of microcracks. The mechanical cycle increases the fracture tip stress and finally leads to a fracture network.

Key words: slope engineering; silty mudstone; moisture-thermo-mechanical effects; fracture development; microstructure

---

我国南方公路工程建设中,因边坡开挖揭露了大量粉砂质泥岩[1].富含黏土矿物的粉砂质泥岩具有吸水膨胀、失水收缩、易于风化的特性[2].受到外界温湿条件变化及荷载扰动的耦合作用后,粉砂质泥岩产生裂隙,岩体分裂,部分岩块脱落,最终导致边坡崩塌破坏.因此,开展湿热力耦合条件下粉砂质泥岩裂隙演化研究,对于南方泥岩边坡养护工程具有一定意义.

大量学者对泥岩裂隙演化规律及内在机理进行了研究.富含黏土矿物的岩石,与水接触时产生膨胀,导致裂隙扩展、丛集[3],且裂隙演化具有时空渐进的特点[4].水化作用下,泥岩微观结构破坏,微裂隙发育,造成表面开裂[5].有学者利用低场核磁共振技术发现干湿循环作用下泥岩内部孔隙率呈显著的线性增长[6].干湿循环是岩土体在自然环境中容易遇到的环境作用[7],随干湿循环次数增加泥岩裂隙发育显著[8].这说明湿度对于泥岩裂隙发育是极其重要的因素.热量对于泥岩分解同样具有很大的促进作用[9],温度越高,润湿速度越快,产生的裂纹越多[10],有学者指出颗粒间不均匀的溶胀变形是泥岩内部微裂隙产生的主要原因[11].微裂隙是力学薄弱面,在其范围内,内聚力偏低,力作用下较易被楔破,进而使裂隙连通[12];有学者研究了压缩以及压剪荷载下泥岩破坏裂隙形态[13-14].由此可见,温度、荷载作用同样是泥岩裂隙发育的促进因素.在湿热力耦合作用方面,岩体裂隙演化试验及理论有部分学者进行了研究.有研究表明水-热-力耦合作用会促使裂隙尖端产生较大的拉剪应力,从而进一步贯通[15];谈云志等[16]探究了湿力耦合循环下泥岩开裂崩解作用模式;另有学者研究了荷载下湿热耦合作用下泥岩裂隙发育[17].可见泥岩裂隙发育的相关研究居多,然而较少考虑湿热力单因素及多因素耦合的循环作用对裂隙演化的影响.微观结构研究是目前揭示泥岩宏观破坏机制的常用方法,但微观结构变化的定量分析以及微观结构变化与宏观破坏之间的关联性还需进一步深入研究.

以南方地区常见的粉砂质泥岩为研究对象,同时开展湿热力单因素和多因素耦合循环作用下的裂

隙演化试验,探究湿热力单因素及多因素耦合循环作用下裂隙演化规律,分析湿、热、力对裂隙发育的影响程度,再利用X射线衍射、扫描电镜微观测试手段,定量表征微观结构变化特征以及宏微观关联性,进而揭示裂隙扩展机制.

1 试验方案

1.1 试样制备

本试验所用粉砂质泥岩取自湖南省浏阳市蕉溪镇一处公路边坡,此地粉砂质泥岩天然含水率为8.17%,块体密度为2.27 g/cm^3,吸水率与饱和吸水率分别为9.33%和10.26%.选取无明显节理裂隙以及杂质的完整岩块制成尺寸为70 mm×70 mm×210 mm(长×宽×高)的长方体试样和直径50 mm、高度100 mm的圆柱体试样,后采用打磨机对所有试样进行打磨,保证两端面不平整度误差小于0.05 mm,高度、直径误差不大于0.3 mm,端面垂直于轴线最大偏差小于0.25°,加工完成后立即使用密封膜包裹.为减小岩体原始缺陷对试验结果带来的影响,使用ZT-801岩体参数测定仪对试样进行声波检测,挑选超声波波速在2.50±0.05 km/s范围内的试样进行裂隙演化试验.

1.2 循环试验

取样地白天光照直射,温度高、湿度低;夜晚基岩水分上渗,湿度高、气温低;结合边坡浅层2~3 m以内承受的覆土压力以及当地夏、冬两季气温上下波动峰值,设置单因素、多因素耦合循环试验,见表1.为严格控制单一条件变化,表1中单因素循环试验条件具体实施如下:浸水采用水浴锅,控制温度30 ℃进行,烘干采用恒温烘箱,控制温度30 ℃进行;将试样放置于充满水的密封铝罐利用高低温箱施加5 ℃、60 ℃的低、高温条件;轴向荷载设置为50 kPa,采用自制加载支架堆叠砝码实现加载.为实现表1中不同耦合循环试验条件,设计一种多因素耦合循环模型箱,见图1.模型箱由保温箱、高温照射灯、加载架、覆水箱组成,具体条件施加方式为:浸水通过将试样置入盛水钢化玻璃缸实现,耦合循环试验水位控制在同一高度;加热采用3个可调节温度的225 W钨丝灯实现;加载采用与单因素相同的方式进行,实现无水、低温(南方冬季室内温度)、无荷载关闭或取走相关设备即可.

表1 循环试验方案

Tab.1 Cyclic test scheme

试验类型		单次循环条件		最终循环次数	试样尺寸/mm
		12 h	12 h		
单因素	湿度循环	浸水	烘干	15	50×100(圆柱体试样)
	温度循环	低温	高温		
	荷载循环	有荷载	无荷载		
多因素耦合	湿热力耦合	无水、高温、有荷载	浸水、低温、无荷载	15	70×70×210(长方体试样)
	湿热耦合	无水、高温	浸水、低温		
	湿力耦合	无水、有荷载	浸水、无荷载		
	热力耦合	高温、有荷载	低温、无荷载		

在单因素循环试验中,由于仪器设备和取样条件的限制,且为了严格控制单因素变化条件,使用圆柱体试样较为合适;在多因素耦合循环试验中,为便于施加多因素耦合作用条件以及分析湿热力不同耦合循环作用下的裂隙发育规律,采用长方体试样,试样尺寸见表1.因无须对两种试验的结果作定量对比分析,故试样形状与尺寸差异不影响本文结论.为了减少试样离散性影响,每组循环试验进行3次平行试验,试验结果取平均值.

1.3 裂隙图像采集与处理

裂隙演化试验中,对完成循环次数1、3、5、7、9、11、13、15后的试样对表面使用高清相机进行拍摄.圆柱体试样侧面每隔22.5°拍摄一次,拍摄时固定相机位置,保持光线均匀.圆柱体试样得到16幅侧面图,长方体试样得到4幅侧面图,结合上下面,将其进行平面展开的拼接处理,得到循环试验后的试样平面展开图,见图2(a).后对其进行二值化,得到灰度图,见图2(b).已有研究表明,利用Image Pro Plus软件对软岩裂隙灰度图像进行处理时,根据直方图阈值法,在阈值[127,255]范围内进行分割能够获得较准确的裂隙几何参数[8],据此,对图2(b)进行阈值分割处理,之后进行降噪处理,得出裂隙骨架图,分

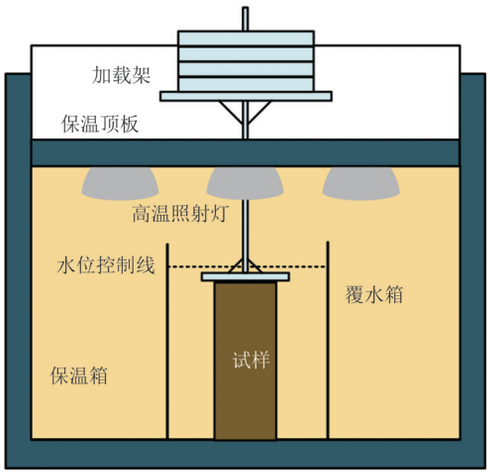


图 1　多因素耦合循环模型箱

Fig. 1　Model box for multi-factor coupling cycles

别见图 2(c)、(d).统计裂隙率、裂隙条数、平均长度及平均宽度,裂隙率指裂隙面积与试样面积之比,反映裂隙总体发育程度;裂隙条数指试样裂隙产生数量;平均长度用来分析裂隙延伸规律;平均宽度表征裂隙演化过程的张开度[18].

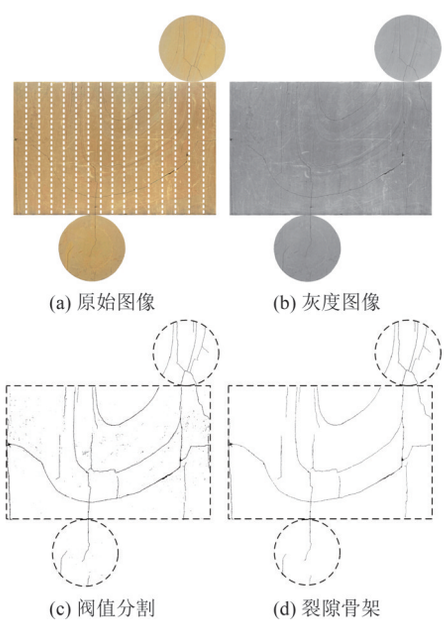


图 2　图像处理

Fig. 2　Image processing

1.4　微观试验

为进一步讨论粉砂质泥岩裂隙发育的内在机理,进行微观试验,微观试验采用两种测试手段,具体如下.

1.4.1　X 射线衍射试验

将天然状态和第 7 次、第 15 次单因素循环作用后的试样刮下表层,研磨成能通过 320 目(0.004 69 mm)筛的粉末,取 400 g,进行自然风干.采用德国布鲁克 AXS 公司的 D8ADVANCE 型 X 射线衍射仪对上述样品进行 X 射线衍射试验.

1.4.2　扫描电镜试验

选取天然状态、单因素第 7 次和第 15 次以及多因素耦合第 15 次循环作用后的试样,制成边长约 10 mm、高 3~5 mm 的扁平岩块,运用德国蔡司 EVO10 扫描电镜仪进行扫描电镜微观试验,对试样表面进行观察,并保存 2 000、5 000 放大倍数图像.

2　试验结果分析

2.1　裂隙扩展定性分析

2.1.1　单因素循环试验

图 3 给出了单因素循环试验裂隙演化结果,即循环 15 次后图像.由图 3(a)可得,湿度循环作用试样表面裂隙发育显著,经历 15 次循环后,形成纵横向裂隙网络;由图 3(b)可知,整个温度循环过程中,试样表面无裂隙产生,在顶部和底部仅有一处碎屑剥落;由图 3(c)得出荷载循环试样表面无损伤.这说明单独荷载循环(0~50 kPa)、温度循环(5~60 ℃)15 次作用不会促进表观裂隙产生,单独的湿度变化(浸水~烘干)会使试样产生表观裂隙,在 15 次循环后已形成裂隙网络,试样完全破坏裂开;表明环境可遇的单独湿度变化能够引起粉砂质泥岩裂隙扩展,且作用效果明显.

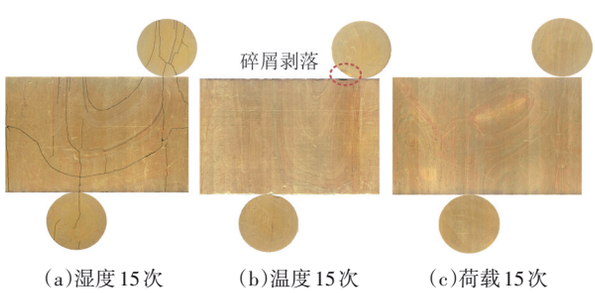


图 3　单因素循环试验裂隙演化结果

Fig. 3　Fracture evolution results of single-factor cyclic tests

2.1.2　多因素循环试验

图 4 给出了多因素循环试验裂隙演化结果.由图 4(a)可以看出,湿热力耦合循环作用 15 次裂隙发育显著,且试样上部裂隙数量多于下部;试样顶部与加载架、底部与覆水箱接触边角处有碎屑剥落.图 4(b)为湿力耦合循环裂隙演化结果,可以看出,有纵向和横向裂隙产生,裂隙发育程度明显弱于湿热力耦合循环作用.图 4(c)和图 4(d)分别为热力和湿热耦合

循环作用15次后裂隙扩展图形,裂隙较为发育,无碎屑剥落.对比多因素试验裂隙演化结果,发现湿、热、力对于裂隙扩展均有较大影响,但是单独作用时,热、力作用裂隙不发育;多因素耦合循环作用均出现多裂隙稳定发育,试样底面一直处于端面约束作用下,造成试样上部裂隙发育程度均大于其下部,且裂隙之间一般为平行姿态向下发育.

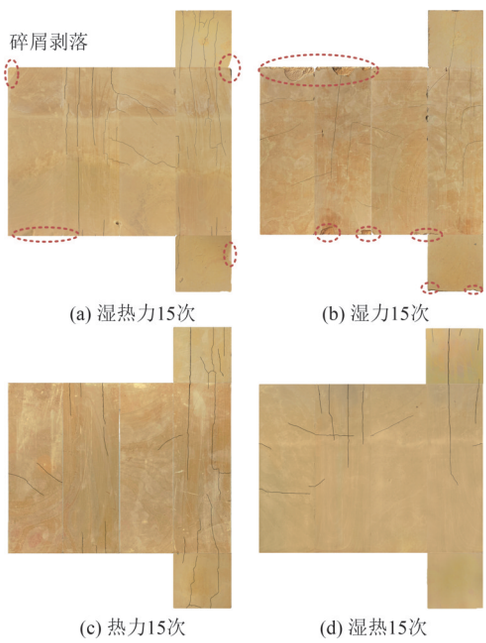


图4 多因素耦合循环试验裂隙演化结果

Fig. 4 Fracture evolution results of multi-factor coupling cyclic tests

2.2 裂隙扩展定量分析

2.2.1 单因素循环作用

图5给出了单因素循环作用下裂隙几何参数变化规律.如图5(a)所示,湿度循环作用下,随循环次数增加,裂隙率先呈现线性增长,在13次循环后,趋于稳定,此时,裂隙发育显著,形成裂隙网络.经历15次循环后,裂隙率达到0.52%.

从图5(b)可知,湿度循环作用在第1次循环后出现7条裂隙,1~5次循环为裂隙萌生的蓄势期,裂隙条数增长缓慢;5~9次循环为爆发期,裂隙条数在此时期内快速增长,9次循环后裂隙条数达到19条;之后缓慢减少,经历15次循环后,最终稳定在17条.说明裂隙发育到一定程度相互贯通,条数减少,同时,不断有新裂隙萌生,故而裂隙条数减少幅度较小.

从图5(c)中可以看到湿度循环下裂隙延展程度随其次数增加大致经历增长-稳定-持续增长三个阶段,7次循环后,由于裂隙条数快速增加而裂隙率增加较为缓慢,平均长度出现减小现象;11次循环后,裂隙率稳定,但是裂隙条数减少,因此平均长度进入增长阶段;循环15次后达到62.21 mm.

从图5(d)中得出裂隙平均宽度在0.2 mm左右波动,第3次和第13次循环作用宽度数值有减小趋势,相较于前一次循环作用减小幅度分别为16.45%和41.28%;在第13次循环之后,宽度减小至0.14 mm,后湿度循环作用效应保持稳定,宽度未出现明显变化.这说明泥岩在湿度循环作用下开裂后,裂隙宽度不会发生太大变化,但是出现了增大与减小的交叉现象,这与泥岩非均质性、湿干循环胀缩不是完全可逆[19]的性质相关,在经历13次循环后,试样膨胀变形累积,开裂面靠拢,裂隙宽度减小.

2.2.2 多因素耦合循环作用

图6给出了多因素耦合循环作用下裂隙几何参数变化规律.如图6(a)所示,裂隙率均保持大致的线性增长到平稳的变化趋势,多因素耦合循环作用对裂隙发育总体影响程度排序为湿热力>湿热>湿力>热力,耦合循环作用15次后,裂隙率按照上述顺序分别为0.92%、0.67%、0.54%、0.32%.

从图6(b)可知,裂隙条数变化均呈现增加-平缓趋势,无减小趋势,说明裂隙贯通效应速率较低.湿热力耦合循环作用15次后试样最终出现30条裂隙,热力耦合循环作用15次后试样最终出现21条,湿力耦合循环作用15次后出现14条,而湿热耦合循环作用15次后只有13条,说明湿热力耦合循环作用对裂隙产生的促进作用最大,热作用促进裂隙发育显著.

图6(c)为不同湿热力耦合循环作用下平均长度变化趋势,增长趋势大体一致,从出现裂隙开始裂隙缓慢延伸扩展,经历15次循环后,湿热力耦合循环作用裂隙平均长度达到60.58 mm,湿热达到48.22 mm,湿力达到38.55 mm,热力达到32.88 mm,湿热力耦合循环作用下试样最终裂隙平均长度最大,这是由于其裂隙总长远远大于其余耦合循环作用试样.

从图6(d)可以得到循环1次后裂隙平均宽度变化基本稳定,与单因素湿度循环作用变化趋势一致,在整个循环阶段裂隙平均宽度都出现增大与减小的交叉现象,但是增幅和减幅微弱.由于黏土矿物分布的不均匀和胀缩并非可逆的性质,导致裂隙发育过程中宽度变化具有轻微的不稳定性.不同因素耦合循环作用下裂隙平均宽度最终分别稳定在:湿热0.51 mm、湿热力0.47 mm、湿力0.43 mm、热力

0.38 mm.湿热耦合循环作用下试样上端面无荷载约束作用,裂隙自由扩展,裂隙宽度最大.

总体而言,湿热力循环作用最能促进粉砂质泥岩开裂,湿热、湿力、热力循环作用的致裂性依次减弱,符合单因素循环试验得出的湿度循环作用促进裂隙发育显著这一规律.

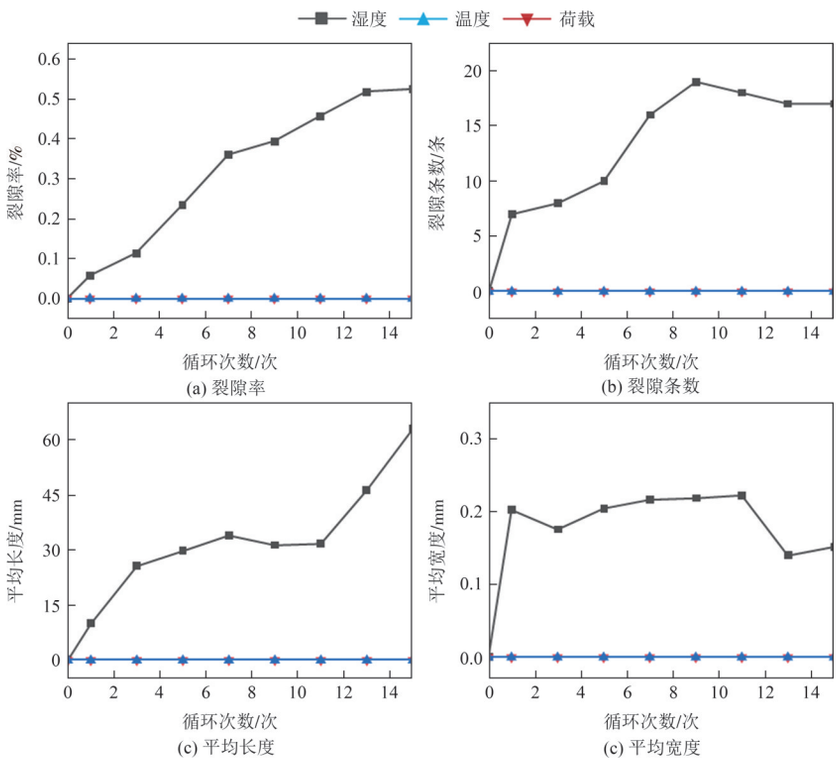


图 5　单因素循环作用下裂隙几何参数变化规律

Fig. 5　Variation of fracture geometric parameters under single-factor cycles

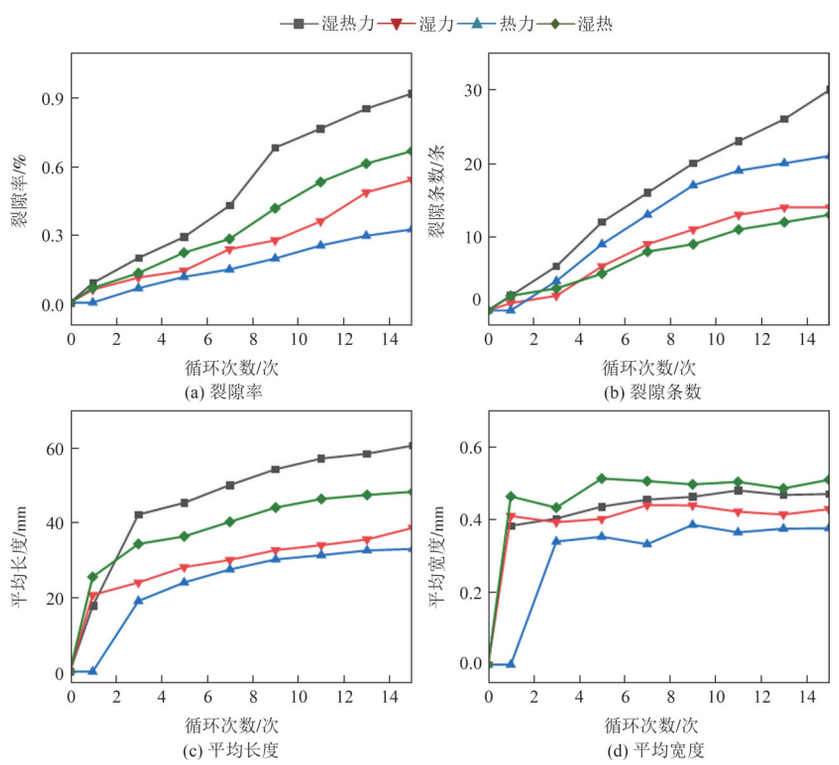


图 6　多因素耦合循环作用下裂隙几何参数变化规律

Fig. 6　Variation of fracture geometric parameters under multi-factor coupling cycles

2.3 微观试验结果分析

2.3.1 矿物成分及晶层间距

对天然粉砂质泥岩进行X射线衍射图谱分析，从图7中可以看出，其组成成分有石英、伊利石、蒙脱石、绿泥石以及长石等，石英含量在40%以上，以伊利石为主的黏土矿物质量分数在50%左右，其余矿物成分大致占10%.对经历湿度、温度、荷载循环的试样进行XRD测试，由图8可知，湿、热、力单因素循环作用7次、15次后，均无新的衍射峰出现，说明本文试验条件不会改变粉砂质泥岩矿物组成.

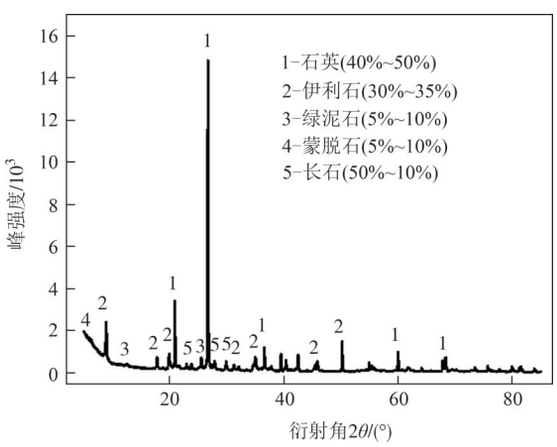


图7 天然试样X射线衍射图谱

Fig. 7 X-ray diffraction pattern of natural samples

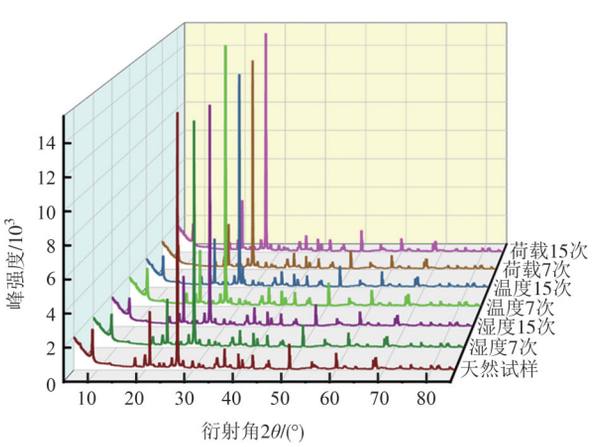


图8 单因素循环作用下的X射线衍射图谱

Fig. 8 X-ray diffraction pattern under single-factor cycles

对上述X射线衍射图谱进行分析，可定量分析黏土矿物在湿度、温度、荷载循环作用下晶层间距变化规律[20]，具体见表2.从表2得出，伊利石和蒙脱石随着湿度、温度循环次数增加，晶层间距逐渐增大，蒙脱石晶层间距变化幅度大于伊利石；而荷载循环作用下晶层间距有轻微减小趋势.这是由于湿度循环与温度循环试样存在吸水条件，晶胞-水作用使得黏土矿物晶层间距发生变化，由于蒙脱石晶体层间连结力弱，故其对于外界条件变化敏感性强，因此其晶层间距变化幅度较大；推测在荷载循环作用下，由于压缩作用，黏土矿物晶层间距减小.

表2 黏土矿物晶层间距变化

Tab. 2 Changes of interlayer spacing of clay minerals

条件	伊利石		蒙脱石	
	2θ/(°)	晶层间距/nm	2θ/(°)	晶层间距/nm
天然试样	9.05	0.978	6.41	1.379
湿度循环7次	8.90	0.993	6.32	1.397
湿度循环15次	8.86	0.997	6.20	1.424
温度循环7次	9.00	0.982	6.38	1.385
温度循环15次	8.92	0.991	6.30	1.403
荷载循环7次	9.07	0.974	6.43	1.374
荷载循环15次	9.12	0.969	6.44	1.372

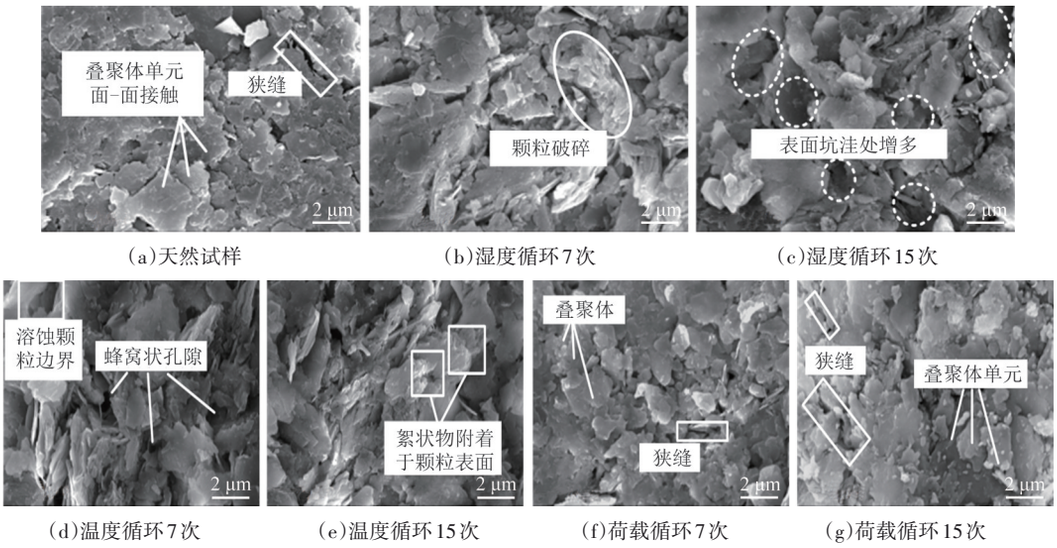
2.3.2 颗粒结构特征变化分析

取5 000放大倍数的SEM图像进行微观结构分析.从图9(a)可以看出，粉砂质泥岩主体骨架是由片状颗粒叠加而成，结构较密实.片状颗粒相互接触，大部分为面-面接触，也存在一些边-面接触，由于片状颗粒叠加穿插特性，存在一些天然孔隙，多为狭窄缝隙.

图9(b)为粉砂质泥岩在控制温度下进行湿度循环7次后微观结构形貌，基础骨架形态仍为片片叠加，黏土矿物经历多次胀缩过程，原片状颗粒破碎，形成细小颗粒.同时与底部颗粒胶结作用逐渐减弱，导致出现部分颗粒剥落，另一部分附着于底部颗粒上方，边-面接触增加，单元体之间边界明显，孔隙明显多于天然试样.粉砂质泥岩在湿度循环15次后，破碎颗粒大部分剥落，表面坑洼，平整性大幅度降低，具体见图9(c).

为控制湿度、温度循环在浸水条件下进行，从图9(d)、图9(e)可以看出：温度循环作用下，有较大的骨架颗粒剥落，狭长状孔隙明显少于湿度循环作用，有蜂窝状孔隙出现，为水分子进入试样内部提供大量通道；颗粒边界受到溶蚀作用逐渐模糊，絮状物明显多于湿度循环作用，同样出现颗粒破碎.从中可看出颗粒破碎量少于湿度循环，这是由于高温促进分子运动，导致了破碎颗粒大量脱落.由图9(f)、(g)可知，荷载循环7次、15次作用下叠聚体单元完整，但颗粒逐渐被压缩成扁平状，部分颗粒产生滑移，出现部分狭缝扩大的现象.

湿热力单因素循环作用会改变黏土矿物晶层间距，晶层间距与产生的膨胀力相关[20].晶层间距扩大时，膨胀力增加，达到某一临界值，颗粒破碎.晶层间



(a)天然试样　(b)湿度循环7次　(c)湿度循环15次

(d)温度循环7次　(e)温度循环15次　(f)荷载循环7次　(g)荷载循环15次

图9　单因素作用微观结构变化特征

Fig. 9　Variation of microstructural characteristics under single-factor cycles

距减小时,颗粒内部产生损伤,在下一次膨胀时,颗粒更易破碎.此过程中,颗粒间胶结作用减弱,破碎颗粒部分脱落,孔隙进一步延伸贯通.由表2可知,湿度循环作用引起的晶层间距变化最大,荷载循环作用几乎对晶层间距无影响;对微观结构破坏程度从大到小同样是湿度循环、温度循环、荷载循环作用(图9).因此,在宏观裂隙演化试验中,具有湿度循环作用的试样较无湿度循环作用的试样裂隙发育更加显著.

2.3.3　湿热单因素循环微观孔隙形貌定量分析

选择2 000放大倍数的粉砂质泥岩微观图像,利用图像处理软件提取几何参数,进行微观孔隙变化定量分析.孔隙率用以说明微观结构孔隙含量;长短轴比用于表示孔隙形态;分形维数可用于描述二维块体及其轮廓的不规则程度以及其自相似性.

表3显示,粉砂质泥岩天然试样孔隙率为0.43%,随着湿度循环的进行,孔隙率不断增加,在15次循环后达到1.39%;温度循环7次到15次孔隙率从1.83%变化到1.72%,有减小趋势.说明孔隙率先增加,到达一个临界循环次数后慢慢减小,推测是由于水化作用,矿物颗粒碎屑、絮状物填充孔隙的结果.荷载循环作用致使孔隙压密,因此经历7次、15次荷载循环后孔隙率为0.48%、0.41%,呈现降低趋势.

以孔隙长短轴比为指标分析其形状性,长短轴比数值越大说明孔隙单向延伸程度越高,即孔隙形状越狭窄,如表3所示,将孔隙长短轴比划分成(0, 5)、[5, 10)以及[10, ∞)三个区间,其中0表示孔隙不存在,孔隙狭窄程度高,长短轴比数值会较大,因此最后一个区间为数值为10以及10以上的开区间.可以看出,天然试样、荷载作用15次的孔隙狭窄程度高,长短轴比在[10, ∞)区间的占比分别达到20.80%、20.06%,温度循环作用下孔隙狭窄程度较低,长短轴比在[10, ∞)区间内占比只有12.21%.可见,湿度和温度作用会使得孔隙由狭长状形态慢慢向圆孔形态发育,不断为水分进入试样内部提供更为有利的通道.

表3　微观孔隙几何参数

Tab. 3　Geometric parameters of micro-pores

样品	孔隙率/%	长短轴比区间占比/%			分形维数
		(0,5)	[5,10)	[10,∞)	
天然试样	0.43	60.11	19.08	20.80	1.446
湿度循环7次	1.05	64	22	14	1.408
湿度循环15次	1.39	62.40	19.29	18.27	1.394
温度循环7次	1.83	59.13	23.48	17.39	1.396
温度循环15次	1.72	59.54	28.24	12.21	1.320
荷载循环7次	0.48	58.44	20.15	21.41	1.438
荷载循环15次	0.41	59.13	20.81	20.06	1.422

采用面积-周长法计算分形维数,岩石微观孔隙具有自相似性,其孔隙面积与周长存在如下关系[21]:

$$\lg P = \frac{D}{2}\lg A + C \tag{1}$$

式中:P为孔隙周长;A为孔隙面积;D为孔隙形态分形维数;C为常数.将孔隙面积、周长做双对数散点图,进行线性拟合得出直线,斜率的2倍即为孔隙的分形维数,如表3所示.

从表3可以得到,天然试样分形维数为1.446,荷载循环作用分形维数变化不大,7次、15次后分别为

1.438 和 1.422;在温度、湿度循环作用下分形维数持续减小,温度循环 7 次、15 次作用下分形维数分别为 1.396 和 1.320,小于湿度循环 7 次、15 次作用下分形维数 1.408 和 1.394.说明在温度、湿度循环作用过程中,孔隙边界不规则程度逐渐降低,自相似性提高,更加趋于圆形,为孔隙发育贯通提供条件;同时,分形维数越低孔隙开度越大,为水进入内部与黏土矿物接触提供条件.

2.3.4 *宏微观参数关联定量分析*

为分析宏观裂隙扩展与微观结构变化的关联,以湿度循环裂隙演化及相应微观试验结果为例,采用灰关联度分析法进行定量研究.因裂隙率可反映裂隙总体发育程度,将湿度循环 0 次、7 次、15 次的裂隙率设为参考序列 x_0,以伊利石晶层间距、蒙脱石晶层间距、孔隙率、孔隙分形维数作为比较序列 x_1、x_2、x_3、x_4.计算步骤为:无量纲处理;求取同一时刻参考序列与各比较序列的差值,找出差值中绝对值的最小值与最大值;通过式(2)、式(3)计算灰关联度[22].

$$\zeta_i(k)=\frac{\min\limits_i\min\limits_k\left|x_0(k)-x_i(k)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_k\left|x_0(k)-x_i(k)\right|}{\left|x_0(k)-x_i(k)\right|+\rho\max\limits_i\max\limits_k\left|x_0(k)-x_i(k)\right|} \tag{2}$$

$$r_i=\frac{1}{N}\sum_{K=1}^{N}\zeta_i(k) \tag{3}$$

式中:$\zeta_i(k)$为关联系数;$\min\limits_i\min\limits_k\left|x_0(k)-x_i(k)\right|$为参考序列 x_0 与比较序列 x_1、x_2、x_3、x_4 去量纲化后相差最小值的绝对值;$\max\limits_i\max\limits_k\left|x_0(k)-x_i(k)\right|$为对应最大值;$\rho$ 为分辨系数,取 0.5;r_i 为各比较序列与参考序列的关联度.

根据式(2)和式(3),得到参考序列(裂隙率)与比较序列(伊利石晶层间距、蒙脱石晶层间距、孔隙率、孔隙分形维数)的各灰关联度分别为 0.600、0.600、0.813 和 0.591.根据计算结果可知,各微观结构参数对粉砂质泥岩裂隙扩展的灰关联度由大到小的排列为:孔隙率、晶层间距、孔隙分形维数,其中孔隙率与裂隙率的灰关联度最大,为 0.813.即孔隙率增长规律与宏观裂隙延伸扩展趋势最为接近,表明微观结构变化中孔隙发育是造成裂隙扩展的主要因素.

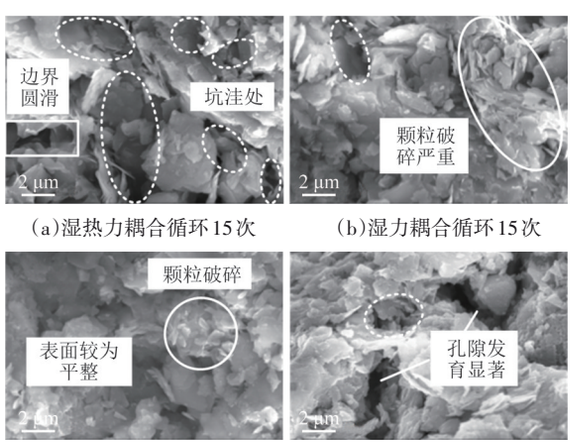
3 裂隙扩展机制探讨

粉砂质泥岩中伊利石为主要黏土矿物成分,含少量蒙脱石,不含高岭石.伊利石和蒙脱石均为 Si—Al—Si 层叠状结构,具有显著的膨胀、收缩特性[14].遇水时,伊利石与水结合反离子逸出,分子层间引力降低,水分子进入,晶层间距增大,蒙脱石层间为 O^{-2}—O^{-2} 弱化学键联结,水分子更易进入,晶层间距变化幅度大于伊利石[23].温度变化会促进或者抑制分子热运动,影响水分子扩散进入层间,导致分子胀缩[24];而在荷载作用下,晶体层间被压缩,抑制水分子扩散.

天然粉砂质泥岩存在原始微观孔隙,为水与内部黏土矿物颗粒接触提供通道.浸水时,水与伊利石和蒙脱石内部发生反应,产生内部膨胀;由于异价阳离子的晶格取代作用,黏土矿物颗粒表面带有负电,水为偶极体,在静电引力作用下形成极化水分子层,使得颗粒表面产生外部胶结膨胀[23].由于伊利石和蒙脱石在湿度变化下膨胀性的不同以及分布的随机性,加上温度和荷载作用不同程度的促进和抑制作用,表面颗粒边界及内部在上述过程受到差异性较大的胀缩分布力.

由于以上原因,多因素耦合循环作用微观结构被显著破坏,见图 10.如图 10(a)所示,湿热力耦合循环作用 15 次后,孔隙边界圆滑,坑洼处数量较多面积偏大,微观结构破坏严重.由图 10(b)可得,湿力耦合循环使颗粒破碎严重;热力耦合循环中无湿度变化作用,孔隙发育不明显,热作用下矿物膨胀不均匀,颗粒破碎,见图 10(c).图 10(d)给出了湿热耦合循环作用微观结构变化,可知,无荷载作用,和表面无约束情况下,孔隙纵横发育显著.

由多种裂隙演化和微观试验结果可知,设置的温度循环条件(5~60 ℃)和荷载循环条件(0~50 kPa)



(a)湿热力耦合循环 15 次 (b)湿力耦合循环 15 次

(c)热力耦合循环 15 次 (d)湿热耦合循环 15 次

图 10 多因素耦合作用微观结构变化特征

Fig. 10 Variation of microstructural characteristics under multi-factor coupling cycles

单独作用对于黏土颗粒膨胀收缩性影响较小,对微裂隙萌生、扩展促进作用不明显,表面无裂隙产生.温度和荷载循环在单独作用时虽然对粉砂质泥岩裂隙演化影响程度较低,但在与湿度变化耦合作用中是一个及其重要的促进因素.当存在水时,温度变化会极大地促进泥岩结构的破坏[11],而荷载作用则会加剧宏观裂隙端部的应力集中现象.

由上述可得湿热力耦合循环作用下裂隙发育过程为:颗粒破碎、脱落,孔隙率增长,且孔隙从狭长状向蜂窝圆状转化,大量水分进入内部,黏土矿物与水继续发生反应,孔隙连通,微裂隙产生;不同矿物对温度的敏感性具有差异,故不同位置的热膨胀和低温收缩存在区别[25],同时试样从上至下还产生了较大的水分梯度,两种作用引起剧烈的区域性差异胀缩,造成微裂隙纵横向延伸扩展,最终试样表面形成宏观裂隙;宏观裂隙形成之后,上部荷载作用下,裂隙尖端应力集中,促使其进一步发育;在上述作用下最终形成裂隙网络.

4 结 论

1)湿热力单因素循环作用中,湿度循环(浸水~烘干)最易引起粉砂质泥岩开裂,接下来依次是温度循环(5~60 ℃)、荷载循环(0~50 kPa).在多因素耦合循环作用中,裂隙发育的强烈程度排序为:湿热力>湿热>湿力>热力,体现了湿热力单因素循环作用下致裂性排序.

2)在湿热力多因素耦合循环作用下,裂隙率、裂隙条数、裂隙平均长度均表现出增长-平缓变化趋势,裂隙平均宽度稳定在某一数值上下波动.湿热力耦合循环作用15次裂隙率达到0.92%,裂隙条数至30条,平均长度延伸至60.58 mm,平均宽度在0.47 mm左右增大与减小.说明粉砂质泥岩自开裂起,裂隙向四周及深处延伸扩展,且不断有新裂隙萌生,但宽度变化较小.

3)单因素循环作用会促使黏土矿物晶层间距发生变化,导致孔隙发育、开度增大,同时提高孔隙边界自相似性.湿度循环15次蒙脱石晶层间距扩张至1.424 nm,伊利石达0.997 nm,孔隙率从0.43%增长到1.39%,孔隙分形维数从1.446减小至1.394.黏土矿物晶层间距、孔隙率及孔隙分形维数与裂隙率的灰关联度分别为0.600、0.813和0.591,说明孔隙率与裂隙发育的关联程度最大.

4)黏土矿物分布的不均匀性和胀缩差异性是粉砂质泥岩裂隙发育的内在原因.湿热力耦合循环作用下,晶层间距扩张致使颗粒内外部受到不均匀胀缩力,导致颗粒破碎、孔隙逐渐发育成微裂隙,温度循环加剧了不同截面应力分布差异,荷载作用增加尖端应力,最终致使粉砂质泥岩形成裂隙网络.

上述结果对泥岩边坡养护工程具有一定意义,但还存在以下不足:未对粉砂质泥岩在不同湿热力作用下内部裂隙时空演化进行分析;未深入解释裂隙平均宽度交叉出现原因;未从断裂力学的角度对粉砂质泥岩开裂进行研究.在后期工作中将逐渐对上述问题进行完善.

参考文献

[1] 曾铃, 姚小飞, 陈镜丞, 等. 不同因素影响下粉砂质泥岩水分迁移试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 146-155.
ZENG L, YAO X F, CHEN J C, et al. Water migration test of silty mudstone affected by different factors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 146-155. (in Chinese)

[2] 付宏渊,曹硕鹏,张华麟,等. 湿-热-力作用下软岩边坡破坏机理及其稳定性研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2081-2098.
FU H Y, CAO S P, ZHANG H L, et al. Progress and prospect of failure mechanism and stability analysis of soft rock slope under wet-heat-force action [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52 (7): 2081-2098. (in Chinese)

[3] 张磊, 刘镇, 周翠英. 红层软岩浸水裂纹扩展试验与破裂机制分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51(6): 35-40.
ZHANG L, LIU Z, ZHOU C Y. Experiment of crack propagation of red-bed soft rock in water and micromechanical mechanism of crack propagation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2012, 51(6): 35-40. (in Chinese)

[4] 李盛南, 刘新喜, 李玉, 等. 炭质泥岩渐进破坏过程的变形特性及损伤演化研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 99-107.
LI S N, LIU X X, LI Y, et al. Study on the deformation characteristics and damage evolution law of the progressive failure process of carbonaceous mudstone[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 99-107. (in Chinese)

[5] 付业扬, 刘朝晖, 高乾丰, 等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩微观结构及持水特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(1): 292-304.
FU Y Y, LIU C H, GAO Q F, et al. Microstructure and water holding characteristics of pre-disintegrated carbonaceous mudstone under the action of wetting and drying cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(1): 292-304. (in Chinese)

[6] ZHAO Y F, REN S, JIANG D Y, et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain [J]. Construction and Building

Materials,2018,191:923-931.

[7] 陈龙旭, 王帅, 罗大天,等. 干湿循环下红砂岩路基填料回弹模量控制研究[J]. 中外公路,2020,40(4):250-255.
CHEN L X, WANG S, LUO D T,et al. Study on resilient modulus control of red sandstone subgrade filler in drying-wetting test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 250-255.(in Chinese)

[8] 曾铃, 罗锦涛, 侯鹏, 等. 干湿循环作用下预崩解炭质泥岩裂隙发育规律及强度特性[J]. 中国公路学报, 2020, 33(9): 1-11.
ZENG L, LUO J T, HOU P, et al. Crack development and strength characteristics of pre-disintegrated carbonaceous mudstone under dry-wet cycles[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(9):1-11.(in Chinese)

[9] ZHANG D, CHEN A Q, LIU G C. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal conditions[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1):127-136.

[10] FU H Y, JIANG H B, QIU X, et al. Seepage characteristics of a fractured silty mudstone under different confining pressures and temperatures[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1907-1916.

[11] WANG T, YAN C Z, ZHENG H, et al. Microfracture behavior and energy evolution of heterogeneous mudstone subjected to moisture diffusion[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 150: 104918.

[12] 车平, 宋翔东, 虞翔, 等. 巢湖地区坟头组泥岩遇水软化特性与机理试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 396-401.
CHE P, SONG X D, YU X, et al. Experimental study on softening characteristics and mechanism of soaking mudstone from Fentou formation in Chaohu area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(3): 396-401.(in Chinese)

[13] 王传洋, 杨春和, 衡帅, 等. 压缩荷载下泥岩裂缝演化规律的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(6):1 591-1597.
WANG C Y, YANG C H, HENG S, et al. CT test for evolution of mudstone fractures under compressive load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1591-1597.(in Chinese)

[14] 柴肇云, 康天合, 陈维毅, 等. 泥岩压剪破坏裂隙演化规律及其分形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊2): 3844-3850.
CHAI Z Y, KANG T H, CHEN W Y, et al. Fracture evolutionary rules of mudstone under coupled compression and shear and its fractal characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup.2): 3844-3850.(in Chinese)

[15] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2):305-320.
LIU Q S, LIU X W. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 305-320.(in Chinese)

[16] 谈云志, 胡莫珍, 周玮韬, 等. 荷载-干湿循环共同作用下泥岩的压缩特性[J]. 岩土力学, 2016,37(8): 2165-2171.
TAN Y Z, HU M Z, ZHOU W T, et al. Effects of drying-wetting cycle and loading on compressive property of mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8):2165-2171.(in Chinese)

[17] HU M, LIU Y X, REN J B, et al. Laboratory test on crack development in mudstone under the action of dry-wet cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(1): 543-556.

[18] 邓鹏, 王桂尧, 梅智鹏, 等. 根系分布对膨胀土干缩开裂影响试验研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(1): 19-25.
DENG P, WANG G Y, MEI Z P, et al. Test study on the effect of root growth direction on cracking characteristics of expansive soil[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(1): 19-25.(in Chinese)

[19] 鲍桂勇, 许杨少君, 蒋植洁, 等. 干湿循环下水泥改性膨胀土裂隙及渗透特性研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 198-204.
BAO G Y, XU Y S J, JIANG Z J, et al. Research on crack and permeability characteristics of cement-modified expansive soil nuder dry-wet cycle[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 198-204.(in Chinese)

[20] 朱宝龙, 李晓宁, 巫锡勇, 等. 黑色页岩遇水膨胀微观特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 3896-3905.
ZHU B L, LI X N, WU X Y, et al. Experimental study of micro-characteristics of swelling for black shale under influence of water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup.2): 3896-3905.(in Chinese)

[21] 刘晓菓, 何忠明, 卢逸恒, 等. 考虑应力变化的炭质泥岩粗粒土微观结构特征研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 16-22.
LIU X Q, HE Z M, LU Y H, et al. Study on microstructure characteristics of coarse-grained carbonaceous mudstone soil considering stress change[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(2):16-22.(in Chinese)

[22] 何虹霖, 邹晓翎, 叶向前, 等. 多孔性沥青混凝土路面降噪性能影响因素研究[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 61-65.
HE H L, ZOU X L, YE X Q, et al. Study on influencing factors of noise reduction performance of porous asphalt concrete pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 61-65.(in Chinese)

[23] 李桂臣, 李菁华, 孙元田, 等. 泥岩多尺度模型与水岩作用特性研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1138-1154.
LI G C, LI J H, SUN Y T, et al. Advance of multi-scale study on both analytic models and water-rock interaction characteristics of mudstone[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(3): 1138-1154.(in Chinese)

[24] 张亚云, 陈勉, 邓亚, 等. 温压条件下蒙脱石水化的分子动力学模拟[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(10): 1489-1498.
ZHANG Y Y, CHEN M, DENG Y, et al. Molecular dynamics simulation of temperature and pressure effects on hydration characteristics of montmorillonites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(10): 1489-1498.(in Chinese)

[25] JIANG F F, ZHOU H, SHENG J, et al. Effects of temperature and age on physico-mechanical properties of cemented gravel sand backfills[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 2999-3012.