

杨志全, 李飞洋, 甘进, 等. 富水环境下强-中风化硅质板岩吸水特性及微观演化规律[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 013036.

YANG Zhiquan, LI Feiyang, GAN Jin, et al. Water absorption behavior and its micro-evolution law of strongly-moderately weathered siliceous slate under water-rich environment[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 013036.

富水环境下强-中风化硅质板岩吸水特性及微观演化规律

杨志全^{1,2,3,4}, 李飞洋^{1,2,3,4}, 甘进^{1,2,3,4}, 赵鹏飞^{1,2,3,4}, 付梦^{1,2}, 闫煜^{1,2}, 谭皓^{1,2}, 张建^{1,2}, 朱颖彦^{1,2,3,4}

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 昆明理工大学 应急管理部地质灾害风险防控与应急减灾重点实验室, 云南 昆明 650093; 4. 昆明理工大学 云南省高校高烈度地震山区交通走廊工程地质病害早期快速判识与防控重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要: 为探讨富水环境下强-中风化硅质板岩的吸水特性及吸水过程微观演化规律, 以玉溪至楚雄段国家高速公路旧寨隧道中的强-中风化硅质板岩为研究对象, 开展浸水试验、电镜扫描试验和X射线衍射试验。试验结果表明: 富水环境下强-中风化硅质板岩吸水过程可分为急速吸水阶段(0~2 h)、缓速吸水阶段(2~24 h)和平衡吸水阶段(超过24 h)等3个阶段。急速吸水阶段, 岩石结构变得较为松散、孔隙及微裂隙逐步延伸发展; 缓速吸水阶段, 胶结物溶解、脱落, 岩石结构进一步松散、孔隙及裂隙进一步发育, 逐渐形成显著的贯穿性裂隙; 动态平衡吸水阶段, 岩石结构松散程度、孔隙及裂隙发育程度基本达到稳定状态。强-中风化硅质板岩主要矿物组成为石英和黏土矿物, 随着浸水试验的进行, 石英相对含量增加, 黏土矿物含量不断减小; 伊利石、伊蒙混层等黏土矿物遇水极不稳定, 既能与水发生化学反应, 转化成石英和其他黏土矿物, 又能与水发生物理反应, 表现出膨胀、破碎和分解等特性。研究成果可为开展强-中风化硅质板岩吸水软化特性的理论研究提供参考。

关键词: 富水环境; 强-中风化硅质板岩; 吸水特性; 微观演化规律

中图分类号: TD32

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2024)01-3036-12

Water absorption behavior and its micro-evolution law of strongly-moderately weathered siliceous slate under water-rich environment

YANG Zhiquan^{1,2,3,4}, LI Feiyang^{1,2,3,4}, GAN Jin^{1,2,3,4}, ZHAO Pengfei^{1,2,3,4}, FU Meng^{1,2}, YAN Yu^{1,2}, TAN Hao^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}, ZHU Yingyan^{1,2,3,4}

(1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Key Laboratory of Geological Disaster Risk Prevention and Control and Emergency Disaster Reduction of Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Key Laboratory of Early Rapid Identification and Prevention and Control of Geological Diseases in Traffic Corridor of High Intensity Earthquake Mountainous Area of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To study the water absorption characteristics and microscopic evolution law of strongly and moderately

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-01-03 责任编辑: 张沛

基金项目: 云南省阿瑟夫·汉院士工作站资助项目(202105AF150076); 云南省重点研发计划资助项目(202003AC10002); 云南省基础研究计划面上资助项目(202001AT070043)

作者简介: 杨志全(1983—), 男, 四川巴中人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事自然灾害起动机理与防控等方面的研究工作。E-mail: yzq1983816@kust.edu.cn

通信作者: 朱颖彦(1971—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士, 主要从事岩土力学与防灾减灾工程方面的研究工作。E-mail: zh_y_y@imde.ac.cn

weathered siliceous slate under water-rich environment, the immersion test, scanning electron microscope test and X-ray diffraction test were conducted on the strongly and moderately weathered siliceous slate in Jiuzhai Tunnel of Yuxi-Chuxiong National Expressway. The results show that the water absorption process of strongly and moderately weathered siliceous slate under water-rich environment can be divided into three stages: rapid water absorption (0–2 hours), slow water absorption (2–24 hours) and dynamic equilibrium water absorption (more than 24 hours). In the stage of rapid water absorption, the rock structure becomes loose, and pores and microcracks gradually extend and develop. During the slow water absorption stage, the cement dissolves and falls off, and rock further loosens, producing further pores and cracks and forming obvious penetrating cracks gradually. In the stage of dynamic equilibrium water absorption, the looseness of rock structure and the development of pores and fractures basically reach a stable state. The main mineral components of strongly and moderately weathered siliceous slate are quartz and clay minerals. In water immersion test, the relative content of quartz increases, but clay minerals decrease. Clay minerals, such as illite and illite-montmorillonite mixed layer, are extremely unstable when exposed to water. They can not only react chemically with water and transform into quartz and other clay minerals, but also react physically with water, showing the characteristics of swelling, crushing and decomposition. The research results can provide reference for the theoretical research of water absorption and softening of strongly-moderately weathered siliceous slate.

Key words: water-rich environment; strongly-moderately weathered siliceous slate; water absorption behavior; microscopic evolution law

硅质板岩作为我国西部地区一种普遍存在的复杂地质岩体,尤其在云南,分布广泛。因其内部节理发育充分,层间胶结差,使得硅质板岩吸水作用明显。尤其是强-中风化硅质板岩,在富水环境下能快速吸水,导致层间胶结物溶解、脱落,岩石内部孔隙和裂隙发展,引起物理力学性质的大幅度降低。这极易诱发边坡失稳^[1-2],开挖隧道掉块、坍塌^[3]等灾害事故,从而造成较大的经济损失和人员伤亡。

水对岩石力学性质的弱化和灾害的发展起着重要作用^[4],为此,学者们针对不同岩石的吸水特性开展了诸多研究工作。LI等^[5]对页岩开展了吸水及力学试验,结果表明水显著劣化了页岩的物理力学特性,且双电层理论可以很好地解释页岩吸水时宏、微观结构和性质的变化;张秀莲等^[6]也通过对绿泥角闪岩进行吸水和单轴压缩试验来探究岩石的吸水特性和遇水强度折减规律,并结合电镜和压汞试验分析了影响岩石吸水特性的因素及吸水后微观结构的变化;何满潮等^[7-9]分别以不同种类的岩石为研究对象,进行吸水、电镜扫描和X射线衍射试验,得出了试样吸水的过程函数,并发现有效孔隙度、黏土矿物的形态、含量和初始含水率是影响岩石吸水能力的重要因素;MENG等^[10]等探究了温度对膨胀岩吸水特性的影响,试验结果显示,

提高温度可以显著提高试样的吸水率;张芳等^[11]探索了在降雨温湿环境下砾岩、砂岩和绿帘角闪岩的吸水特征,指出温度对岩石吸水量的影响较小,但大于湿度的影响;赵二平等^[12]通过三轴压缩试验研究了卸荷程度对砂岩吸水性能的影响,结论显示,砂岩吸水率总体随着卸荷量和围压的增加而增大;齐怀远等^[13]以砂岩为研究对象,测试了岩样超声波波速与吸水率,开展了单轴压缩试验,分析了砂岩力学损伤特征;杨晓杰等^[14-15]采用自主设计的吸水试验系统,对不同岩石进行了有压和无压吸水试验,得出相似的结论:压力的存在会显著提高岩石的吸水率;吕情绪等^[16]研究表明,奥灰含水层顶部地层岩石,吸水、渗透性较差,孔隙结构性较差;张曦等^[17]利用自主设计搭建的承压瓦斯自然吸水实验系统研究含瓦斯煤体渗吸水变形特征;张镞等^[18]研究了浸水时间对浸水风干煤初始自燃特性的影响机制;连清旺等^[19]探讨了泥质页岩吸水特性的尺寸效应,结果表明,增大试样的尺寸会导致饱和和吸水率的降低;李鹏^[20]研究了不同含水率下复合坝体试件弹性模量、抗压强度及抗拉强度的变化关系;寇瑞堂等^[21]通过抗压抗折强度、吸水率试验及XRD, TG微观测试分析了水泥砂浆各项性能,研究表明,随着底泥掺量增加,砂浆强度逐渐降低、吸水率升高。除上述试验方法外,最近,数值

模拟方法也被用于研究岩石的吸水软化效应^[22-23]。

综上所述, 吸水过程中岩石的软化效应、影响因素及宏、微观结构变化是目前探究岩石吸水特征的主要研究内容, 但针对强-中风化硅质板岩的吸水特征研究尚未较好把握。因此, 笔者以玉溪至楚雄段国家高速公路旧寨隧道中的强-中风化硅质板岩为研究对象, 通过开展浸水试验、吸水强度试验、电镜扫描(SEM)试验和X射线衍射试验, 探讨其在富水环境下的吸水特性及吸水过程微观演化规律。研究成果可为开展强-中风化硅质板岩吸水软化特性的理论研究提供参考。

1 试验方案

1.1 试样

试验岩样取自国高网G8012玉溪至楚雄段高速公路旧寨隧道K22+702掌子面。从现场调查看, 该区域不仅属于典型的强-中风化硅质板岩发育区, 也属于典型的富水区域。采用现场设备, 取样加工得到了80余块直径90 mm、高度100 mm的圆柱形试样供浸水试验使用。同时, 在现场取样测量得到岩石的天然密度为 $2.36 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, 天然含水率为 $2.27\% \pm 0.35\%$ 。

1.2 浸水试验

依据GB/T50266—2013《工程岩体使用方法标准》开展强-中风化硅质板岩浸水试验(图1)。操作步骤如下: 首先将所有试样置于 $105 \sim 110 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内24 h, 之后取出放入干燥箱冷却至室温并称取质量; 采取自由浸水法, 注水没过水槽中的试样, 达到预定时间后取出试样, 并用湿毛巾沾去表面水分后称取质量, 通过式(1)计算相应时间内岩石的吸水率。本次试验设置0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 18.0,

24.0, 36.0, 48.0, 72.0, 96.0 h共14个时间节点的浸水试验, 每个时间节点至少开展5个岩样的浸水试验, 保证试验结果的可靠性。

$$\omega_{at} = \frac{m_{at} - m_{dt}}{m_{dt}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ω_{at} 为浸水第 t 时间岩石的吸水率; m_{at} 为 t 时刻岩样吸水后的质量, g; m_{dt} 为吸水前的干燥质量, g。

同时为测定强-中风化硅质板岩的饱和吸水率, 依据GB/T50266—2013《工程岩体使用方法标准》开展强制饱和吸水率试验, 其饱和吸水率计算方法同式(1)。



图1 浸水试验

Fig. 1 Immersion test

旧寨隧道板岩围岩孔隙率较大, 且板岩自身吸水量主要集中在前期。根据吸水的稳定情况在吸水后半段设定了其他时间节点, 用于观察岩石的饱和吸水程度。当岩石质量不在增长, 处于缓慢吸水状态时, 则认为强-中风化板岩达到了饱和吸水程度。不同时刻强-中风化硅质板岩的吸水试验结果见表1。表1中数据表明, 相同时间内不同试样的吸水率差距可达10%左右, 这是由于人为操作误差和岩石结构非均质分布导致。

表1 不同浸水时间下强-中风化硅质板岩吸水率

Table 1 Water absorption rate of strongly-moderately weathered siliceous slate in different soaking time

浸水时间/h	0	0.5	1.0	1.5	2.0	4.0	6.0	12.0	18.0	24.0	36.0	48.0	72.0	96.0
吸水率/%	0	1.51±0.35	2.00±0.21	3.21±0.39	2.79±0.26	3.31±0.46	3.79±0.23	4.14±0.49	4.27±0.21	4.44±0.46	4.35±0.29	4.47±0.56	4.51±0.47	4.54±0.26

1.3 强-中风化硅质板岩吸水强度试验

根据浸水试验所得试样, 对不同吸水率条件下的岩石进行单轴压缩变形试验及劈裂试验以期获取板岩因吸水而导致的强度变化特征, 探究在不同吸水率下岩石的强度变化(图2)。单轴压缩试验设

备采用微机屏显万能材料试验机, 型号为WEW-3008, 精度为1级。试验设置了0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 18.0, 24.0, 36.0, 48.0, 72.0, 96.0 h共14个时间节点的浸水试验; 在对试验结果进行记录时, 因岩石自身岩性存在差异, 所以存在一定的误

差; 为了减少因试样本身带来的误差, 在计算平均值时, 将异常数据剔除, 而后再对试验数据进行整理。



图 2 放置岩样

Fig. 2 Placing the rock sample

1.4 扫描电镜(SEM)试验

根据浸水试验结果(表1), 选取浸水0(完全干燥), 2.0, 24.0, 72.0 h等4个时间节点的岩样进行SEM试验, 试验所用电镜为捷克所生产的VEGA3 TESCAN 钨灯丝电镜。在浸水后的强-中风化硅质板岩上选取长×宽约为2 mm×2 mm的岩片, 根据要求将岩样加工成规定大小的试样, 并将试样表面的碎屑清除干净, 尽量保持岩片上下面平行; 为了增强试样的导电性和消除电荷聚集, 需要用离子溅射仪对其进行镀金处理; 最后置入钨灯丝电镜下的载物台上并固定进行扫描(图3), 最终得到所需要的SEM图像。



电镜扫描图

图像生成系统

图 3 电镜扫描和图像生成系统

Fig. 3 Electron microscope scanning (left) and image generation system (right)

1.5 X射线衍射(XRD)试验

为了解旧寨隧道板岩的矿物成分以及浸水后岩石的成分变化, 选取部分典型样品进行矿物成分分析。所用X射线衍射仪为产自荷兰PANalytical公司, 型号为X'Pert Powder的XRD设备; 根据浸水

试验方案的设计, 选取浸水为0(完全干燥)、6.0, 72.0 h(近饱和状态)的岩样进行XRD试验。将达到相应浸水时间的岩样用研磨机制成粉末, 并过200目筛子筛选, 得到最终的粉末状试样(图4), 用工具将试样放入具有凹槽的玻璃片中心处, 然后用滤纸压平后清除玻璃片表面多余粉末; 最后将装有试样的玻璃片放入X射线衍射仪进行试验, 得到衍射图谱, 并采用MDI Jade 6.0软件对试验结果进行分析。



图 4 粉末状岩样

Fig. 4 Powdered rock sample

2 试验结果分析

2.1 浸水试验结果

最终可测得强-中风化板岩的强制饱和吸水率为4.85%, 由表1数据可得富水环境下强-中风化硅质板岩的吸水特征曲线, 如图5(a)所示。图5中显示强-中风化硅质板岩的吸水过程可划分为急速吸水、缓速吸水、平衡吸水等3个阶段, 各阶段具体划分如下:

(1)急速吸水阶段(图5(b)): 在前2 h的浸水时间内, 强-中风化硅质板岩急速吸水, 平均吸水速率达1.61%/h; 尤其在1.5 h时, 其吸水速率为3.21%/h。该阶段结束后吸水率能达到强制饱和吸水率的66.19%。

(2)缓速吸水阶段(图5(c)): 在2~24 h的浸水时间范围内, 岩石吸水速率较急速吸水阶段大幅度减小, 平均吸水速率为0.08%/h, 为急速吸水阶段的1/20; 达到24 h时, 其吸水率为4.44%, 达到了强制饱和吸水率的91.55%。

(3)平衡吸水阶段(图5(d)): 超过24 h后, 岩石吸水和失水基本达到平衡状态。表现为在达到72 h(24~96 h)的浸水时长时, 其吸水率仅增加0.19%, 平均吸水速率也仅为 3.00×10^{-3} %/h。

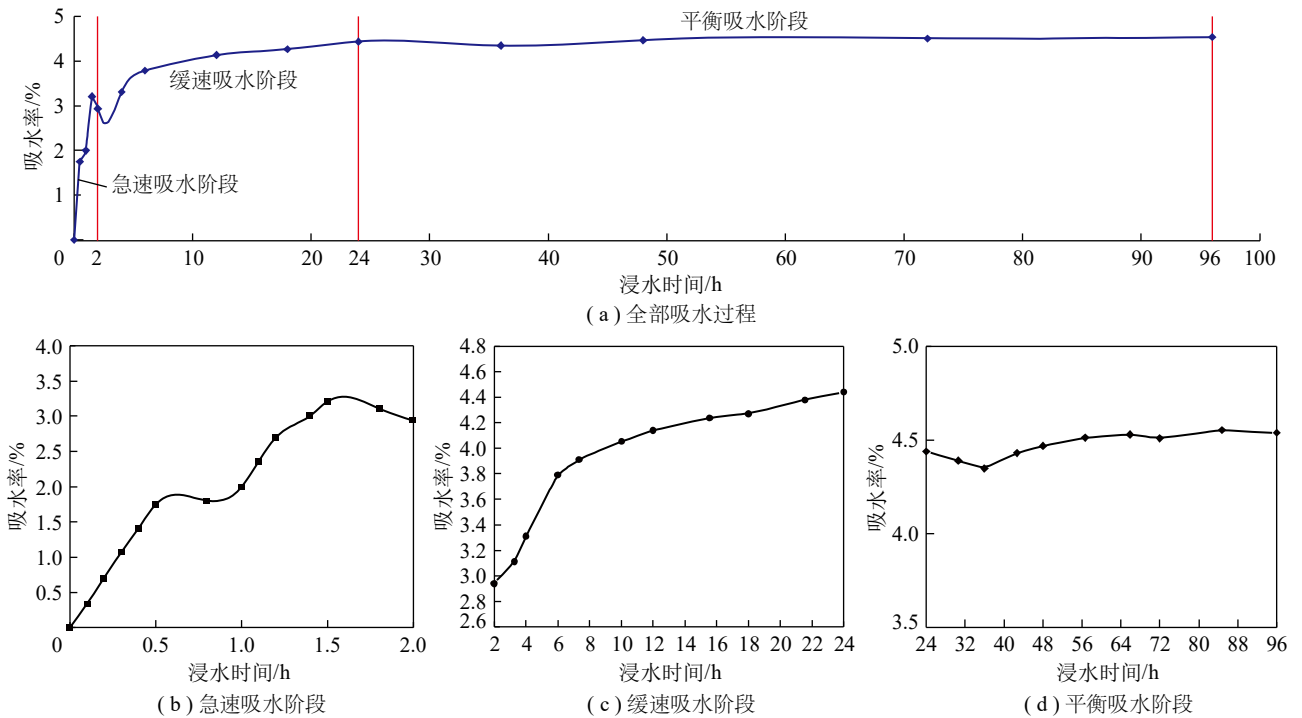


图5 吸水特性曲线

Fig. 5 Water absorption characteristic curves

2.2 强-中风化硅质板岩吸水强度试验结果

经过单轴抗压试验得到了14个时间节点的不同自由浸水历时下岩样的力学参数, 因篇幅有限, 此处仅列举天然状态下自由浸水0, 6.0, 72.0 h的岩样力学参数, 部分试验结果见表2。

试验设置了0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0, 6.0, 12.0, 18.0, 24.0, 36.0, 48.0, 72.0, 96.0 h共14个时间节点的自由浸水试验; 单轴抗压强度和弹性模量随浸泡时间的变化规律如图6和图7所示。由图6可知, 随着自由浸水时间的增长, 岩石试样的单轴抗压强度在逐渐减小^[12]; 天然状态岩石试样的抗压强度为43.28 MPa, 在0~6 h内, 岩石抗压强度平均每小时下降约1.17 MPa, 下降幅度约为16.2%。干燥状态下的岩石抗压强度为43.27 MPa, 在测试浸水时间达到24 h时, 岩石进入平衡吸水阶段, 岩石的抗压强度变化幅度很小, 浸水时间达到72 h时, 岩石抗压强度降至33.58 MPa, 在平衡吸水阶段, 岩石抗压强度最多减小仅有0.27 MPa, 岩石的抗压强度变化在测试浸水时间达到24 h后开始变化很小, 在浸水时间达到48 h后, 发现强-中风化硅质板岩的抗压强度基本不再发生变化。

由图6可知, 在前2 h内, 随着岩石试样的急速吸水, 岩石的抗压强度下降尤为明显, 岩石的抗压

表2 不同自由浸水历时下岩样的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock samples under different free immersion durations

浸水时间/h	最大抗压强度/MPa	平均抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	平均弹性模量/GPa	泊松比	平均泊松比
—	47.13		44.19		0.16	
	43.91		43.15		0.21	
	32.91	43.28	48.31	42.01	0.27	0.22
	47.88		37.74		0.21	
	44.56		36.65		0.24	
	36.46		35.55		0.21	
0	42.39		37.91		0.17	
	41.10	43.27	44.31	41.01	0.22	0.23
	45.24		40.70		0.22	
	44.36		41.12		0.29	
	35.98		38.30		0.23	
	36.84		39.61		0.19	
6	28.97	36.26	34.78	38.87	0.20	0.21
	25.44		30.09		0.18	
	35.95		38.70		0.22	
	34.09		35.47		0.21	
	33.79		39.27		0.32	
	34.00	33.58	34.36	36.81	0.22	0.24
72	35.55		36.97		0.24	
	30.49		37.99		0.22	

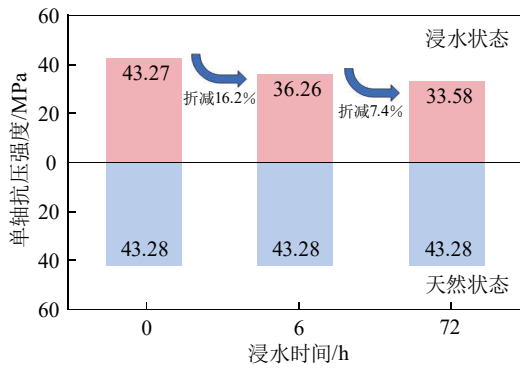


图6 单轴抗压强度随浸水时间的变化曲线

Fig.6 Variation curve of uniaxial compressive strength with immersion time

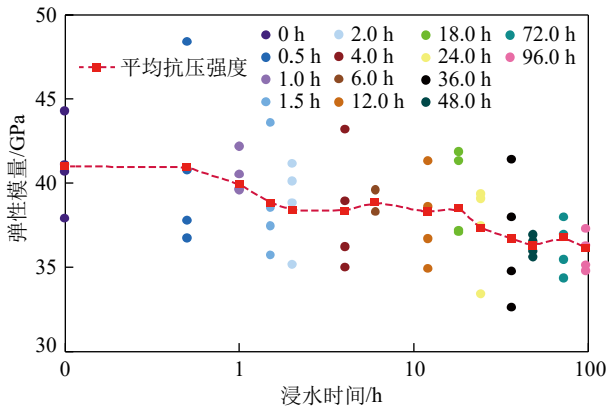
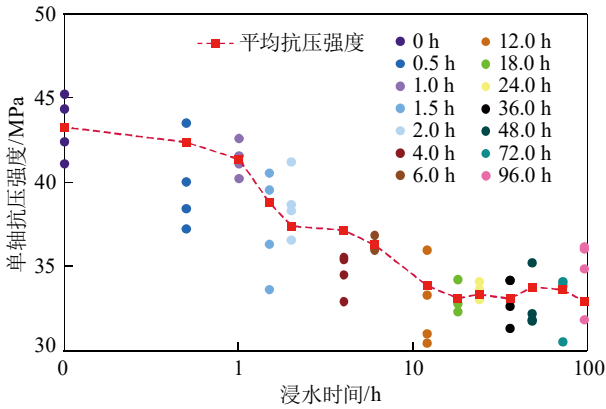


图7 弹性模量随浸水时间的变化曲线

Fig. 7 Change curve of elastic modulus with immersion time

强度下降量达到总下降量的1/3; 2 h后, 岩石进入缓速吸水状态, 同时岩石抗拉强度的下降速率也逐渐降低, 平均每个小时下降0.45 MPa, 24 h时下降至33.32 MPa, 之后岩石的抗压强度变化幅度很小, 与岩石的吸水变化基本一致, 当岩石不再吸水后, 随着浸泡时间的增长, 岩石的单轴抗压强度未发生变化。

由图6可知, 将强-中风化硅质板岩浸水0, 6, 72 h的强度变化与天然强度对比发现, 当浸水时间

在0~6 h时, 抗压强度由43.27 MPa减小为36.26 MPa, 折减16.2%, 由于强-中风化硅质板岩的吸水损伤, 岩石强度明显降低, 当浸水时间在6~72 h时, 抗压强度由36.26 MPa减小为33.58 MPa, 折减7.4%, 这表明随着岩石逐渐由缓速吸水阶段进入平衡吸水阶段, 岩石强度降低幅度减小。

由图7可知, 弹性模量在浸水6 h左右有一定的波动, 分析主要原因是岩石自身的孔隙率及节理面的不同, 从整体上看, 强-中风化硅质板岩弹性模量的变化曲线与单轴抗压强度变化曲线基本一致, 随着浸泡时间的增长, 弹性模量也逐渐降低, 随着浸水时间的增加, 弹性模量的波动小于单轴抗压强度波动, 相较于单轴抗压强度曲线表现更加平稳。干燥状态下的强-中风化硅质板岩试样的弹性模量为41.01 GPa, 在浸水时间达到24 h时, 弹性模量变为37.16 GPa, 下降了3.85 GPa, 岩石进入平衡吸水阶段, 弹性模量随浸泡时间的变化曲线较为平稳, 弹性模量变化幅度减小; 在浸泡时间达到72 h时, 弹性模量下降至36.81 GPa, 之后基本不再发生变化。

由图8可知, 强-中风化硅质板岩的泊松比基本保持在0.20~0.25, 没有发生太大变化, 故认为强-中硅质板岩的泊松比与浸水时间无关, 强-中风化硅质板岩的吸水率只会改变其弹性模量和强度。

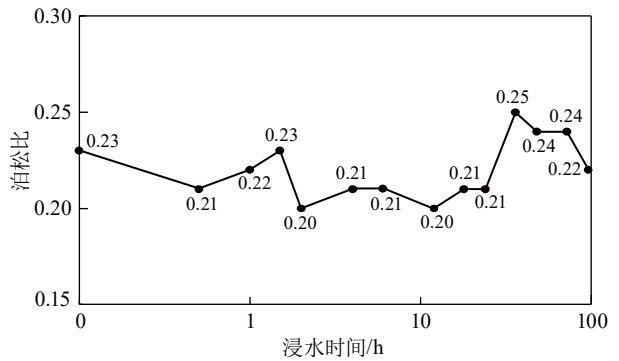


图8 泊松比随浸水时间变化曲线

Fig. 8 Poisson's ratio variation curve

2.3 SEM试验结果

为较清楚直观地分析强-中风化硅质板岩吸水过程中矿物颗粒、孔隙与裂隙结构等微观演化规律, 对浸水0, 2, 24, 72 h后的岩样进行了电镜扫描, 结果如图9所示。

(1)在浸水0 h(完全干燥)状态(图9(a))下, 强-中风化硅质板岩矿物颗粒间排列紧密且颗粒粒径较

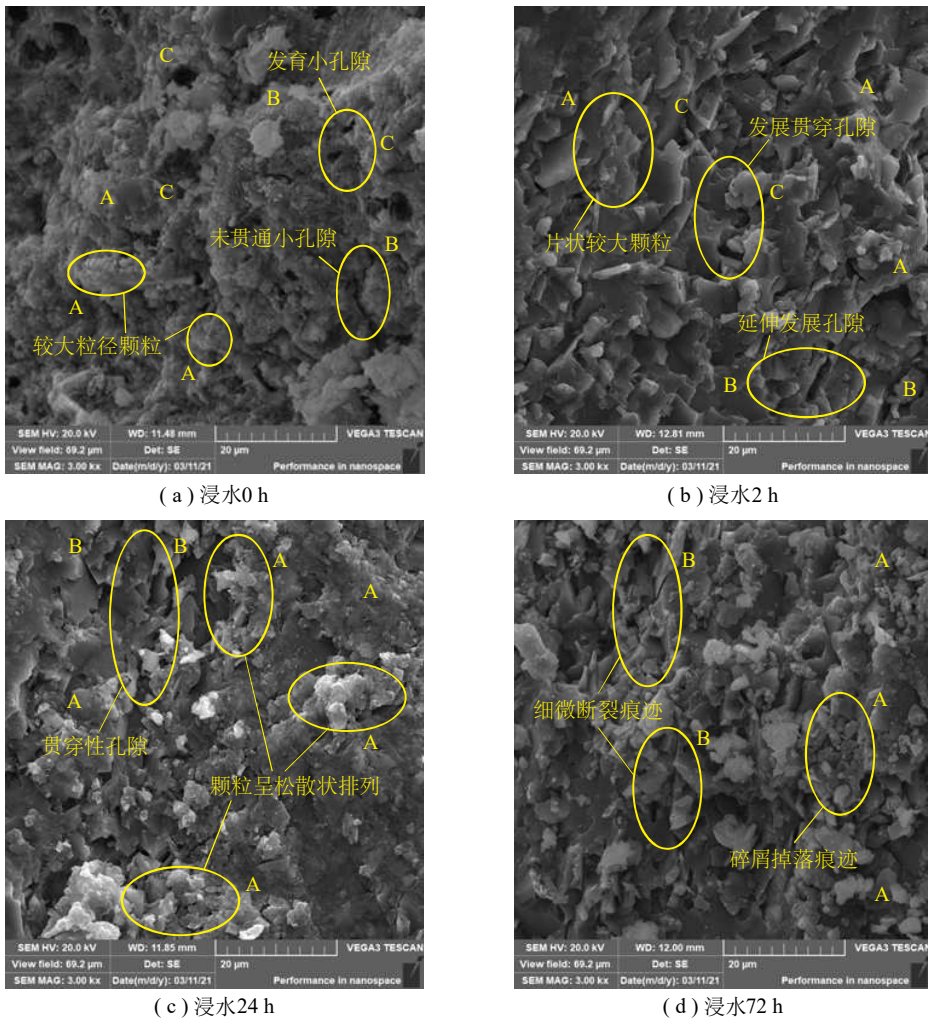


图9 富水环境下不同浸水时间的强-中风化硅质板岩 SEM 图

Fig. 9 SEM images of strongly-moderately weathered siliceous slate at different soaking times

大(标识A), 仅局部分布有小孔隙但未贯通(标识B), 局部颗粒间发育小孔隙且分布密度低(标识C), 岩体结构整体紧密;

(2)在浸水2 h状态(图9(b))下, 强-中风化硅质板岩矿物颗粒排列较松散, 表现为颗粒粒径逐渐变小, 部分胶结物被分解或溶解, 出现片状较大颗粒(标识A), 小孔隙延伸发展(标识B), 颗粒间孔隙尺寸变大且逐步发展贯穿(标识C), 岩体结构整体较为松散;

(3)在浸水24, 72 h状态(图9(c), 9(d))下, 强-中风化硅质板岩的矿物颗粒、孔隙与裂隙结构等方面均具有较一致的变化规律, 即矿物颗粒排列松散、几乎无联结作用, 颗粒间发育的孔隙清晰可见, 颗粒排列松散(标识A), 并且数量增多, 形成了显著的贯穿性裂隙(标识B), 当浸水时间达到72 h时, 颗粒间开始出现细微断裂和掉落痕迹(标识B,

A), 岩体结构整体呈松散状态。

综上所述, 在富水环境下强-中风化硅质板岩吸水过程中, 随着浸水时间的增加, 矿物颗粒排列由紧密向松散演化, 且大粒径颗粒逐渐崩解变小, 被分解为小粒径颗粒, 同时部分小粒径颗粒被水溶解; 孔隙由局部颗粒间发育的、分布密度低的小孔隙逐步演化为清晰可见、数量增多且逐渐贯穿的大孔隙, 裂隙由局部分布的微裂隙逐渐演化形成显著的贯穿性裂隙。

采用PCAS软件对图9中4种状态的SEM图像进一步分析, 得到不同浸水时间下强-中风化硅质板岩其孔隙和裂隙结构的微观分布图(图10), 其中深黑色区域为矿物颗粒分布区域, 白色区域为孔隙、裂隙结构发育区域。由图10可知, 随着浸水时间的增加, 强-中风化硅质板岩内部产生不均匀膨胀, 浸水时间为0 h时, 岩石内部孔隙较小, 处于发展阶

段, 浸水时间达到2 h时, 部分孔隙增大明显, 且延伸发展, 浸水时间达到24 h时, 矿物颗粒排列松散, 延伸发育的孔隙清晰可见, 浸水时间达到72 h时, 颗粒间发育的贯穿性孔隙清晰可见, 并且数量不断

增多, 贯穿性孔隙的增多使岩石内部的颗粒松散排列, 造成岩体内部结构松散, 从而强度降低。由此分析可得到其孔隙、裂隙结构的定量分布结果, 见表3。

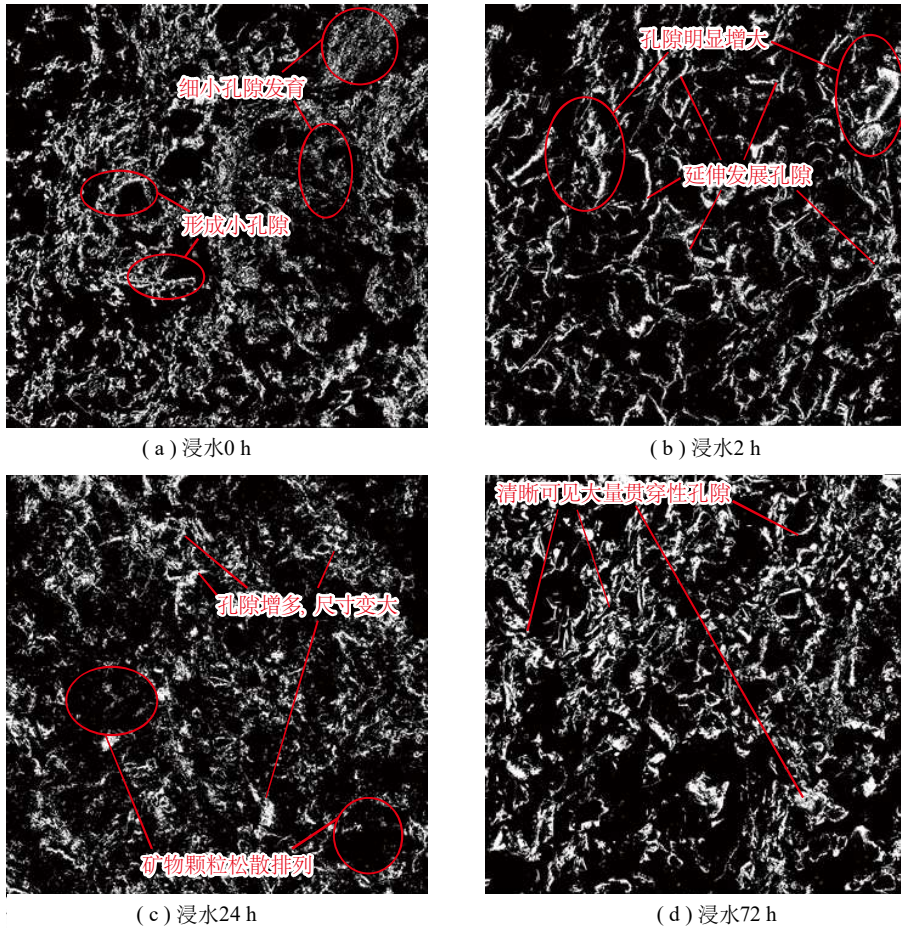


图 10 不同浸水时间下强-中风化硅质板岩的孔隙、裂隙结构微观分布

Fig. 10 Microscopic distribution of pore and fracture structure of strongly-moderately weathered siliceous slate at different water invasion times

表3 不同浸水时间下强-中风化硅质板岩孔隙及裂隙结构的定量分布结果

Table 3 Quantitative distribution results of pore and fracture structure of strongly-moderately weathered siliceous slate at different soaking times

浸水时间/h	0(干燥状态)	2	24	72
孔隙率/%	8.30	13.31	16.21	16.46

由表3可以得到:

(1)在浸水0~2 h的过程中, 岩石孔隙率由8.30%变化到13.31%, 增长幅度为60.36%, 这说明在急速吸水阶段, 强-中风化硅质板岩的矿物颗粒排列由紧密向较为松散的状态变化, 颗粒间孔隙和微裂隙尺寸变大并逐步发展;

(2)在浸水2~24 h的过程中, 孔隙率由13.31%增长到16.21%, 变化幅度为21.79%, 表明了强-中风化硅质板岩在缓速吸水阶段, 矿物颗粒间结构进一步向松散状态转化, 颗粒间的孔隙和微裂隙进一步发育, 形成显著的贯穿性裂隙;

(3)在浸水24~72 h的过程中, 孔隙率由16.21%变化到16.46%, 孔隙率未发生明显变化, 这说明强-中风化硅质板岩在整个平衡吸水阶段, 其矿物颗粒、孔隙及裂隙结构基本达到稳定状态。

2.4 XRD试验结果

对不同浸水时间岩样的X射线衍射图谱进行分析, 不同浸水时间及天然状态下的X射线衍射图如图11所示, 利用MDI Jade 6.0软件的物相搜索功能

并参考相关资料,可以得到强-中风化硅质板岩不同浸水时间岩样的基本矿物成分和不同黏土成分含量,见表4。

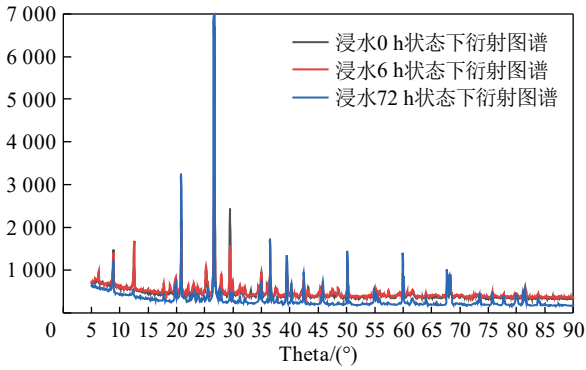


图 11 不同状态下 X 射线衍射图谱

Fig.11 X-ray diffraction patterns under different conditions

表4 不同浸水时间下岩石矿物和不同黏土成分

Table 4 Mineral composition of rocks and different clay under different immersion time

浸水 时间/h	矿物含量/%			不同黏土组分含量/%					
	石英	钾长石	方解石	黏土矿物	I	I/S	K	C	Py
0	53.9	0.6	1.7	43.8	47.2	20.1	8.8	20.3	3.6
6	57.6	0	0	42.4	40.2	16.4	11.7	26.5	5.2
72	68.4	0	0	31.6	31.8	8.0	18.3	41.9	0

表4中,I代表伊利石;I/S代表伊蒙混层;K代表高岭石;C代表绿泥石;Py代表黄铁矿。

由表4可知:强-中风化硅质板岩主要矿物组成为石英和黏土矿物,在黏土组分中,伊利石、伊蒙混层、绿泥石和高岭石占据主要地位,其中伊利石和伊蒙混层含量随着浸水时间的增加而下降,而高岭石和绿泥石含量随着浸水时间的增加而增加;伊利石随着浸水时间的增长所占比例逐渐减小,高岭石和绿泥石所占比例逐渐增大,说明伊利石与水发生反应后迅速溶解,而高岭石溶解程度较小。随着浸水时长的增加,黏土矿物含量由43.8%下降到31.6%,同时通过结合SEM电镜扫描观察到的现象分析发现,这是由于伊利石、伊蒙混层、高岭石等黏土矿物遇水极不稳定,既能与水发生化学反应^[23],转化成石英和其他黏土矿物,这也是石英含量随着浸水时间的增加而显著增加的原因;此外,伊利石、伊蒙混层、高岭石等黏土矿物又能与水发生物理反应,表现出膨胀、破碎和分解等特性,是造成强-中风化硅质板岩内部强度降低的主要原

因。

3 分析与讨论

对以上试验结果进行综合分析可知,试样的吸水特征曲线(图5)斜率不断减小,即吸水速率不断降低,其原因可由以下机理解释:①黏土矿物的存在。首先黏土矿物具有很强的膨胀性,随着浸水时间的增加,黏土体积膨胀导致裂隙通道变窄,从而使吸水速率下降;其次黏土矿物具有较大的比表面积,容易吸附孔隙中的水,随着试验的进行,使岩石具有较高的束水含量,从而降低吸水速率;同时,有些黏土矿物易被溶解和破碎,当碎屑颗粒经过孔隙狭窄处时会导致堵塞,使吸水速率下降^[7,24]。②孔隙的变化。由图9所示,吸水前岩石内部多为微小且呈蜂窝状的孔隙,此时不易存在孔角毛细水,吸水通道较通畅,吸水速率大;之后由于黏土和胶结物等遇水膨胀、溶解或流失的作用,致使孔隙形状多呈三角形和不规则多边形(图9(b),(c)和(d)),此时易在孔角处形成孔角毛细水,进而导致孔隙有效半径降低,使吸水速率减小^[7,15]。

分析图5(b)曲线出现类似双峰现象的原因,可由双电层理论说明:水与岩石相互作用后,会在晶体层间和表面形成扩散双电层,双电层的增厚受到约束,将会产生膨胀力,膨胀力会因持续的积累使岩石骨架坍塌,孔隙变大,吸水速率变大;之后开裂的叠层体持续吸水再次膨胀,导致孔隙变小,吸水速率下降,至此产生双峰形曲线^[10,25]。分析图5(c)可得:缓速吸水结束阶段吸水率(4.44%)与强制饱和吸水率(4.85%)差异较小,仅为0.41%。加上在自然浸水条件下难以达到与试验相同的强制饱和条件,因此建议将缓速吸水结束阶段的吸水率(4.44%)作为强-中风化硅质板岩在自然浸水条件下的饱和吸水率。

通过吸水强度试验得出了强-中风化硅质板岩的强度受浸水作用的影响而发生极大的改变,且吸水强度变化规律与岩石的吸水特性变化规律大致相同;利用扫描电镜试验(SEM)和X射线衍射试验(XRD)着重探讨不同浸水时间强-中风化硅质板岩在浸水作用下其微观结构变化过程及物相变化规律;通过电镜扫描试验分析得到了板岩在吸水过程中内部结构变化,浸泡后部分黏土颗粒膨胀,导致表面的空隙度增大,黏聚力下降,进一步解释了由

板岩吸水特性试验得到的吸水膨胀微观机理(吸水3阶段); 采用PCAS软件对4种状态的SEM图像孔隙和裂隙结构的微观分布图进一步分析, 得到了板岩吸水膨胀微观机理, 并通过XRD试验得到试验所取岩样内部主要成分为石英和黏土矿物, 板岩在吸水过程中, 水进入岩石的内部, 与自身含有的黏土矿物中的蒙脱石、绿泥石、高岭石等发生反应, 产生膨胀作用和溶解作用导致岩石内部的孔隙增加, 进而导致岩石本身的强度降低。综合吸水强度试验得到结论, 揭示了富水状态下强-中风化硅质板岩强度的损伤机理。

对上述试验结果综合分析, 得到以下板岩吸水损伤机理: ①板岩内部黏土矿物发生溶解作用及膨胀作用。板岩经过溶解作用会形成较多的孔隙, 经过膨胀作用在岩石中行成微裂隙, 溶解作用与膨胀作用共同耦合作用是导致板岩吸水软化其中的一个重要原因。黏土矿物与水发生反应导致垂直方向上的膨胀率比层理方向的膨胀率更大, 使板岩更容易产生沿层理面的裂纹。②颗粒形态与孔隙状态的变化。从颗粒形态变化角度分析, 在水中浸泡过程中, 黏土矿颗粒因膨胀作用发生体积膨胀, 颗粒间的相互作用力逐渐降低, 颗粒表面吸附水的结合力并没有太大变化; 与此同时, 岩石内部的毛细管压力逐渐减小, 表面张力也随之降低, 导致岩石的强度降低, 发生软化。从胶结方式和孔隙变化角度分析, 在干燥状态时, 板岩内颗粒之间的胶结主要为孔隙充填式、孔隙衬垫式胶结两种, 结构紧密。通过PCAS软件进行微观图像分析得到板岩浸水后孔隙的变化情况, 在浸泡后, 由于部分黏土颗粒体积膨胀, 产生膨胀应力, 膨胀应力使得板岩内部黏结力变小, 结构松散, 导致板岩强度降低。③水对板岩产生的物理化学作用。水与板岩所产生的物理作用主要为水进入岩石层理面后, 溶于水的矿物会产生泥化效应, 而且会与水发生化学反应, 对岩石的层理面产生巨大的影响, 除泥化作用外, 水在浸入岩石后还会产生一定润滑作用, 使层理面的滑动力有所增加, 岩石更容易发生沿层理面的剪切破坏。④水岩作用的应力耦合。水岩的耦合作用会伴随着应力的产生, 而水的渗流作用降低了岩石的有效应力, 板岩的剪切强度也会随之降低, 水岩的耦合作用力同样会影响板岩的层理面力学特性。当岩石处于自然状态时, 岩石内部不含水, 而

在浸泡之后, 水会随着孔隙进入岩石内部, 而原本处于孔隙中的气体会被挤压, 排到岩石外部。因此在浸水过程中可能会听到气体冒出的声音。岩石试样中主要的矿物颗粒间的黏结力可以包括颗粒之间的吸引力, 颗粒与水之间的作用力(强作用力、弱作用力、毛细管力)及水的压力。岩石内部存在着许多的孔隙和裂缝, 而且这些裂缝与孔隙随机分布于岩石之中。当岩石处于含水状态时, 水会赋存在这些裂缝和孔隙当中。当对岩石施加载荷时, 岩石内部孔隙和裂缝的体积被压缩, 导致岩石发生一定的变形或其他改变。

4 结 论

(1)富水环境下强-中风化硅质板岩吸水过程可分为急速吸水、缓速吸水、平衡吸水等3个阶段。在急速吸水阶段(0~2 h)岩石吸水速率最大, 在缓速吸水阶段(2~24 h), 吸水速率大幅度减小, 在平衡吸水阶段(超过24 h), 岩石仅能吸入极少量的水, 处于动态平衡吸水状态。

(2)富水环境下强-中风化硅质板岩吸水过程的微观演化规律为: 急速吸水阶段, 矿物颗粒结构由紧密向较为松散状态变化, 孔隙和微裂隙逐步延伸发展; 缓速吸水阶段, 结构进一步向松散状态转化、孔隙和微裂隙进一步发育并逐渐贯通, 形成了显著的贯穿性裂隙; 平衡吸水阶段, 强-中风化硅质板岩的矿物颗粒、孔隙及裂隙结构基本不再变化, 达到较稳定状态。

(3)强-中风化硅质板岩主要矿物组成为石英和黏土矿物, 石英含量随着浸水时间的增加而增加, 而黏土矿物含量随着浸水时长的增加不断下降; 在黏土组分中, 伊利石、伊蒙混层、绿泥石和高岭石占据主要地位。

(4)通过强-中风化硅质板岩吸水强度试验得到了板岩单轴抗压强度和弹性模量随浸水时间的变化规律, 强-中风化硅质板岩的泊松比与浸水时间无关, 强-中风化硅质板岩的吸水率只会改变其弹性模量和单轴抗压强度。

(5)通过对板岩的浸水特性试验、吸水强度特征试验和微观试验得到: 强-中风化硅质板岩吸水损伤机理主要受板岩内部黏土矿物发生溶解作用及膨胀作用、颗粒形态与孔隙状态的变化、水对板岩产生的物理作用、水岩作用的应力耦合等几

方面的影响。

(6)强-中风化硅质板岩的吸水损伤机理为: 水进入岩石内部的方式必须通过岩石的层理弱面, 水进入岩石内部后, 会发生一定的物理、化学作用, 这些耦合作用会导致板岩内部产生一定的裂隙, 内部黏聚力逐步下降, 导致强-中风化硅质板岩在宏观上力学性能下降。

参考文献(References):

- [1] 李伟. 双弱层烧变岩边坡失稳模式研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 227-234.
LI Wei. Study on instability mode of double weak layer burnt rock slope[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 227-234.
- [2] 侯敏. 大峰露天矿边坡稳定性分析与治理措施研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(10): 44-50, 55.
HOU Min. Study on slope stability analysis and treatment measures of Dafeng Open Pit Mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(10): 44-50, 55.
- [3] 朱万成, 董航宇, 刘溪鹤, 等. 金属矿山多矿柱承载与失稳破坏研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(4): 043037.
ZHU Wancheng, DONG Hangyu, LIU Xige, et al. Review of bearing and instability of multi-pillar in metal mines[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(4): 043037.
- [4] LI Zhen, LIU Huoxing, DUN Zhilin, et al. Grouting effect on rock fracture using shear and seepage assessment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118131.
- [5] LI Zhen, LIU Shangge, REN Wentao, et al. Multiscale Laboratory study and numerical analysis of water-weakening effect on shale[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 5263431.
- [6] 张秀莲, 韩宗芳, 韩文帅, 等. 南芬露天矿绿泥角闪岩吸水及强度软化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2452-2460.
ZHANG Xiulian, HAN Zongfang, HAN Wenshuai, et al. Water absorption and strength softening law of chlorite amphibolite in Nanfen Open-pit Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2452-2460.
- [7] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1113-1120.
HE Manchao, ZHOU Li, LI Dejian, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1113-1120.
- [8] GUO Hongyun, HE Manchao, SUN Chonghua, et al. Hydrophilic and strength-softening characteristics of calcareous shale in deep mines[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2012, 4(4): 344-351.
- [9] 王桂莲, 李德建, 何满潮, 等. 岩石吸水特性及其孔隙结构变化研究[A]. 中国软岩工程与深部灾害控制研究进展—第四届深部岩体力学与工程灾害控制学术研讨会暨中国矿业大学(北京)百年校庆学术会议论文集[C]. 2009: 260-264.
WANG Guilian, LI Dejian, HE Manchao, et al. Study on water absorption characteristics and pore structure changes of rocks[A]. Research Progress of Soft Rock Engineering and Deep Disaster Control in China-Proceedings of the 4th Symposium on Deep Rock Mechanics and Engineering Disaster Control and Centennial Celebration Conference of China University of Mining and Technology (Beijing) [C]. 2009: 260-264.
- [10] MENG Lingdong, HAN Lijun, ZHU Hexuan, et al. Study on the influence of formation temperature on the water absorption and weathering of swelling rock in Marine Coal Mines[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25: 4207-4220.
- [11] 张芳, 刘文芳, 韩宗芳, 等. 降雨温湿环境下的岩石吸水特征试验研究[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(3): 228-235.
ZHANG Fang, LIU Wenfang, HAN Zongfang, et al. The water absorption test of rock in the rainy and humid environment[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(3): 228-235.
- [12] 赵二平, 贾小兵, 龚章龙, 等. 不同卸荷损伤程度砂岩吸水特性试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(6): 188-191, 224.
ZHAO Erping, JIA Xiaobing, GONG Zhanglong, et al. Experimental research on absorption characteristic of sandstone under different unloading damaged degree[J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 188-191, 224.
- [13] 齐怀远, 王建伟. 峰后冷热循环下砂岩破坏过程力学特征及能量演化规律[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 163-170.
QI Huaiyuan, WANG Jianwei. Mechanical characteristics and energy evolution law of sandstone failure process under post-peak cold and heat cycle[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 163-170.
- [14] 杨晓杰, 王嘉敏, 张民, 等. 大强煤矿深部巷道围岩吸水软化规律试验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(5): 432-438.
YANG Xiaojie, WANG Jiamin, ZHANG Min, et al. Study on strength softening of surrounding rock in deep roadway at Daqiang Coal Mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(5): 432-438.
- [15] 郭宏云, 李兵, 孙崇华, 等. 深部矿井钙质页岩吸水特

- 性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 103–107.
- GUO Hongyun, LI Bing, SUN Chonghua, et al. Experiment research on water absorption features of calcareous shale in deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 103–107.
- [16] 吕情绪, 杨茂林, 许峰, 等. 保德煤矿奥灰含水层顶部地层岩性及孔隙性特征分析[J]. 能源与环保, 2022, 44(7): 67–72, 80.
- LYU Qingxu, YANG Maolin, XU Feng, et al. Analysis on lithology and porosity characteristics of top formation of ordovician limestone aquifer in Baode Coal Mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(7): 67–72, 80.
- [17] 张曦, 马衍坤, 高魁, 等. 含瓦斯煤体渗吸水变形特征实验研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 9–14.
- ZHANG Xi, MA Yankun, GAO Kui, et al. Experimental study on deformation characteristics of water imbibition of coal body containing gas[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 9–14.
- [18] 张镭, 郑万成. 浸水时间对浸水风干煤初始自燃特性的影响[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 136–139.
- ZHANG Lei, ZHENG Wancheng. Influence of immersion time on initial spontaneous combustion characteristics of immersed air-dried coal[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12): 136–139.
- [19] 连清旺, 柴肇云. 高岭石软岩吸水尺度效应试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(6): 53–55.
- LIAN Qingwang, CHAI Zhaoyun. Experimental research on scale effect for absorption of soft rock with high Kaolinite content[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(6): 53–55.
- [20] 李鹏. 地下储水空间复合坝体力学性能实验研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(10): 182–188.
- LI Peng. Experimental study on mechanical properties of composite dam in underground water storage space[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(10): 182–188.
- [21] 寇瑞堂, 郭明志, 储洪强, 等. 掺疏浚底泥砂浆的力学性能及微观结构[J]. 能源与环保, 2022, 44(3): 200–206.
- KOU Ruitang, GUO Mingzhi, CHU Hongqiang, et al. Mechanical properties and microstructure of mortar mixed with dredged sediment[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(3): 200–206.
- [22] 吴承洲, 卞康, 刘建, 等. 考虑非均质性岩石吸水软化效应的颗粒离散元模拟[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 151–154, 150.
- WU Chengzhou, BIAN Kang, LIU Jian, et al. Particle discrete element simulation of water absorption[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5): 151–154, 150.
- [23] 赵维生, 梁维, 许猛堂, 等. 围岩吸水对泥质弱胶结岩石巷道稳定性的影响[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(7): 32–36.
- ZHAO Weisheng, LIANG Wei, XU Mengtang, et al. The influence of water absorption of surrounding rock on the roadway stability of weakly consolidated argillaceous rock[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(7): 32–36.
- [24] 柳培玉, 张娜, 何满潮, 等. 平庄煤矿砂质泥岩吸水特性试验研究[J]. 金属矿山, 2011(9): 49–53.
- LIU Peiyu, ZHANG Na, HE Manchao, et al. Experimental study on water absorption processes of sandy mudstone in Pingzhuang Coal Mine[J]. Metal Mine, 2011(9): 49–53.
- [25] MARTIN C D, LANYON G W. Measurement of in-situ stress in weak rocks at Mont Terri Rock Laboratory, Switzerland[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7): 1077–1088.