

饱水时间对含黏土矿物岩石声发射特性影响的试验研究

骆柯¹, 白宇鑫¹, 赵森¹, 夏冬^{1,2,3*}, 吴朝松⁴, 贾滢斐¹

(1.华北理工大学 矿业工程学院,河北 唐山 063210;2.华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术重点实验室,河北 唐山 063210;
3.华北理工大学 河北省矿区生态恢复产业技术研究院,河北 唐山 063210;4.首钢滦南马城矿业有限责任公司,河北,唐山 063701)

摘要:为研究饱水时间对含黏土矿物岩石力学行为与声发射特性的影响,对含蒙脱石的砂岩开展干燥、饱水及不同浸水时间条件下的单轴压缩力学和声发射试验,重点分析浸水时间对岩石各受力阶段声发射计数率、能率等时域参数的影响.结果表明:饱水时间对含泥质矿物岩石的强度、声发射参数均产生显著影响,饱水岩样的强度由干燥时的 53.52 MPa 下降到 49.51 MPa,浸水超 30 d,水岩耦合作用逐渐减小;岩样在破裂前存在微裂隙快速发育阶段,声发射信号开始活跃并迅速增长,随浸水时间的增加,信号活跃增长期的应变率逐渐减少,浸水 90 d 后,岩样破裂前能率增长期基本消失,表现为失稳破坏时的骤然释放;饱水岩样声发射累积数和累积能量分别为干燥岩样的 20.8%和 30.9%;岩石在破裂过程中的声发射信号总数随浸水时间的增加持续减少,浸水 120 d 后,声发射累积数和累积能量分别为干燥岩样的 0.24%和 0.39%.

关键词:浸水时间;泥质矿物;黄砂岩;声发射;时域特征

中图分类号:TU458 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)02-0026-11

Experimental Study on Influence of Immersion Time to Acoustic Emission Characteristics of Mud Bearing Sandstones

LUO Ke¹, BAI Yuxin¹, ZHAO Sen¹, XIA Dong^{1,2,3}, WU Zhaosong⁴, JIA Yufei¹

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Hebei Provincial Mining Industry Development with Safe Technology Priority Laboratory, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

3. Hebei Industrial Technology Institute of Mine Ecological Remediation, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

4. Shougang Luannan Macheng Limited Liability Company, Tangshan 063701, China)

Abstract: In order to investigate the influence of immersion time to rock mechanics behavior and acoustic emission (AE) characteristics of rocks that contain mud minerals, uniaxial compression strength (UCS) tests and AE tests are conducted on montmorillonite bearing sandstones under different conditions, i.e. dry, saturated, and unequal immersion time. The influence of sandstones' immersion states to the time domain parameters of AE, such as counting rate and energy rate, in the different work stages is the key analytical point. The results are as follows. The immersion time has a significant impact over the strength of rocks that contain mud minerals and AE parameters. The UCS is 53.52 MPa for dry specimens, while this value declines to 49.51 MPa for saturated ones. Water-rock coupling appears inapparent when the immersion time is over 30 d. The rapid development of cracks and active AE signals coexist before fracture. As the immersion time gets longer, the strain becomes smaller in the signals actively increment stage. But after 90 d of immersion, the energy rate growth period is not obvious, and the energy is released suddenly when the rock sample is unstable. The cumulative number and energy of AE

收稿日期:2021-07-13

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2018209281);河北省大学生创新训练资助项目(省级 X2019054)

*通信作者,Email:dianjiahn@163.com

of saturated rock samples are 20.8% and 30.9% of that of dry rock samples respectively. With the immersion time increment, the total number of AE signals keeps decreasing during the rock failure process. After 120 d of immersion, the cumulative number, and energy of AE are 0.24% and 0.39% of dry rock samples, respectively.

Keywords: immersion time; mud minerals; yellow sandstone; acoustic emission; time domain characteristic

在影响岩体工程安全稳定的诸多因素中,地下水是最活跃的因素之一,若岩体长时间处于饱水状态,将导致其稳定性持续降低^[1-2],对于含泥质矿物的岩石而言,这种影响尤为显著^[3].声发射信号包含岩石破裂失稳的丰富信息,因此,开展不同浸水时间作用下含泥质矿物岩石破裂失稳过程中的声发射特性研究,对于实际工程中围岩稳定性监测及灾害预警具有重要的理论意义和实际应用价值.

研究发现,水对含泥质矿物岩石强度、变形、纵波波速、声发射特性等物理、力学参数均具有显著影响.砂岩、砂质泥岩、泥岩等含泥质矿物岩石的抗压强度随含水率或饱和度的增加呈现不同程度的降低^[4-6],有时降低幅度超过 90%^[7-8];同样,岩石的抗拉强度^[9]、弹性模量^[10]、纵波波速^[11]、声发射事件累积计数^[12]、振铃计数^[13]等均随含水率的增加而降低.

对于水文地质条件复杂的岩体工程或涌水量大的矿山,部分受工程影响的岩体可能长期处于饱水状态,而长期饱水对岩石的物理力学参数具有一定的损伤劣化作用^[14],这种劣化作用对含黏土等泥质矿物岩石的影响尤为明显,众多学者采用试验研究的方法,分析了浸水时间对含黏土矿物岩石的强度、弹性模量等物理力学参数的影响规律^[15-22].上述研究成果对水文地质条件复杂的岩体工程稳定性分析、支护方案设计等具有重要的指导意义.长期饱水除对岩石强度、变形等参数产生重要影响外,对其声发射特征也会产生重要影响^[14],而对于长期饱水作用下含泥质矿物岩石破裂失稳过程中声发射特征方面还有待于进行系统而深入的研究,鉴于此,本文以白砾滩煤矿含泥质矿物的砂岩为试验样本,对不同浸水时间的岩样进行单轴压缩条件下的力学试验和声发射试验,探讨浸水时间对声发射计数率、能率、累积计数、累积能量等时域参数的影响规律,重点分析不同浸水时间岩石破裂失稳各受力阶段声发射信号的差异性,以期水文地质条件复杂的岩体工程稳定性评价提供参考.

1 试样制备及试验方法

1.1 试样制备

将现场取得的含泥质矿物的砂岩按《水利水电工程岩石试验规程》(SL264—2001)的要求加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的符合岩石力学试验要求的标准岩样.选 100 块无外观缺陷的岩样进行筛选与分组,部分岩样如图 1 所示.

1.2 岩石成分与结构分析

对样品进行 XRD 衍射分析后可知,岩石内主要成分为石英,并含有少量的黏土矿物蒙脱石.图 2 为 XRD 衍射图谱.

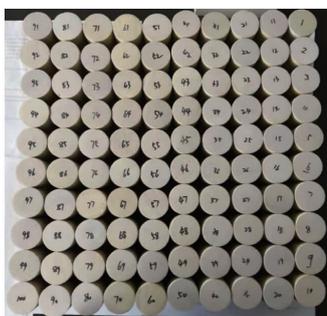


图1 砂岩试件

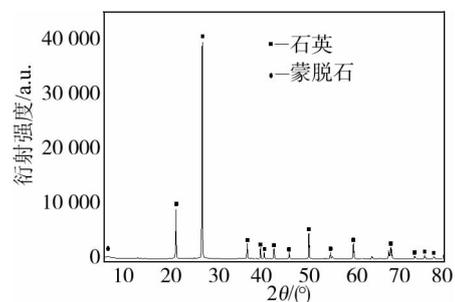


图2 黄砂岩 XRD 衍射图谱

为充分了解砂岩的内部结构,采用光学显微镜 OLYMPUS BX53 对其进行成像分析,如图 3 所示.通过光学成像结构分析可知,岩样以细砂为主,碎屑颗粒以石英为主,少量岩屑和长石,三者皆具溶蚀特点.石英颗粒多具次生加大,加大边宽度 $5 \sim 25 \mu\text{m}$,石英呈次圆状-次棱状,石英长轴 $120 \sim 250 \mu\text{m}$,短轴

50~130 μm, 细砂. 岩屑以花岗岩和火山碎屑岩岩屑为主, 次圆状, 岩屑长轴 90~180 μm, 短轴 50~90 μm, 极细砂-细砂. 长石主要为钾长石, 次圆状, 长石长轴 70~100 μm, 短轴 45~60 μm, 极细砂. 粒间以硅质为主, 少许黏土矿物, 偶见重矿物. 硅质主要为石英次生加大, 为一期加大. 黏土矿物呈隐晶状, 多附着在碎屑颗粒表面.

1.3 试验方法

对选取的 100 个岩样干燥处理后, 进行纵波波速测试, 剔除波速异常的岩样, 将剩余的 60 个岩样依据波速从小到大依次排列, 然后将波速均匀的岩样分布到各组岩样中, 如表 1 所示. 根据试验设计需将岩样分为 12 组, 每组 5 个. 其中 A 组为干燥岩样, B 组为饱水岩样, C~L 组分别为浸水 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 d 的岩样.

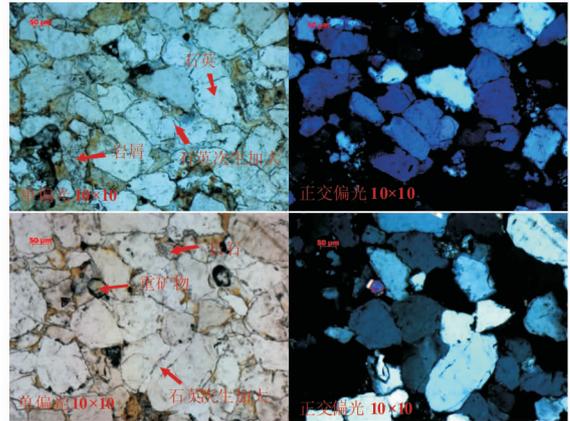


图 3 黄砂岩显微结构

表 1 各组岩样波速

编号	波速/(m/s)										
A-1	2 023	C-1	2 030	E-1	2 087	G-1	2 000	I-1	2 013	K-1	2 107
A-2	2 140	C-2	2 153	E-2	2 203	G-2	2 130	I-2	2 137	K-2	2 210
A-3	2 250	C-3	2 253	E-3	2 277	G-3	2 223	I-3	2 240	K-3	2 307
A-4	2 343	C-4	2 350	E-4	2 383	G-4	2 323	I-4	2 330	K-4	2 397
A-5	2 443	C-5	2 453	E-5	2 483	G-5	2 430	I-5	2 437	K-5	2 490
B-1	2 030	D-1	2 133	F-1	2 107	H-1	2 010	J-1	2 017	L-1	2 130
B-2	2 147	D-2	2 210	F-2	2 207	H-2	2 137	J-2	2 140	L-2	2 220
B-3	2 250	D-3	2 317	F-3	2 290	H-3	2 230	J-3	2 247	L-3	2 320
B-4	2 343	D-4	2 400	F-4	2 390	H-4	2 327	J-4	2 330	L-4	2 427
B-5	2 447	D-5	2 503	F-5	2 483	H-5	2 437	J-5	2 443	L-5	2 523

在完成岩样的加工、筛选、分组后, 采用真空抽气法对所需岩样进行饱水处理, 试验过程中所用水均为纯净水, 以减小由不同水质导致水岩相互作用中化学腐蚀对试验结果的影响. 实验周期最长为 120 d, 因此对浸水时间最长的 L 组进行长期浸水质量监测, 计算 L 组 5 个试件的平均质量, 砂岩进行饱水后质量呈现快速增长, 总计增长 20.65 g, 占总吸水量的 70.31%, 这是由于砂岩孔隙率较大, 水分通过较大裂隙或相互贯通裂隙进入岩石内部, 经过长时间浸水处理, 导致吸水较多. 随浸水时间增加, 砂岩质量总体呈现缓慢增长趋势, 在最初 5 d 内质量增速较快, 总计增长 4.95 g, 占总吸水量的 16.85%, 此时主要是由水分逐渐浸入岩石内部导致, 岩石内部微裂隙并未全部相互贯通, 水分无法通过微裂隙进入岩石内部, 只能通过长时间的缓慢浸入, 因此在浸水第 5 天时含水率出现增长现象, 之后增长趋势逐渐变缓, 到最终时间 120 d 时, 与初始浸水 5 d 相比总计增长 3.77 g, 此阶段总计浸水 115 d, 占总吸水量的 12.84%. 在整个试验过程中, 随浸水时间的增加, 岩样的尺寸没有发生变化.

加载设备采用 TAW-3000 电液伺服岩石常规三轴试验机, 声发射监测系统采用 PCI-2 型声发射系统. 试验开始前需在试件上做 4 个用于固定声发射传感器的皮筋, 具体做法为先用强力胶水将双面胶固定于安放声发射传感器的位置, 然后将皮筋粘在双面胶的另一端. 试验开始前先将试样加载至 2 kN, 之后安装声发射传感器, 传感器安装完成后, 采用加载速率为 0.12 mm/min 的加载方式进行加载.



图 4 加载系统、声发射监测系统及处理好的岩样

在放置声发射探头时需将声发射探头与岩样接触区域涂抹凡士林, 使试件与探头更好耦合, 以利于声

波信号传输.

2 浸水时间对砂岩力学行为的影响

岩石的应力-应变曲线可反映其损伤演化过程,依据试验结果,绘制干燥、饱水及不同浸水时间砂岩的应力-应变关系曲线,如图5所示.因A-2和D-2岩样在试验过程中,试验设备出现故障,故干燥和浸水10 d的岩样只有4条应力-应变曲线.

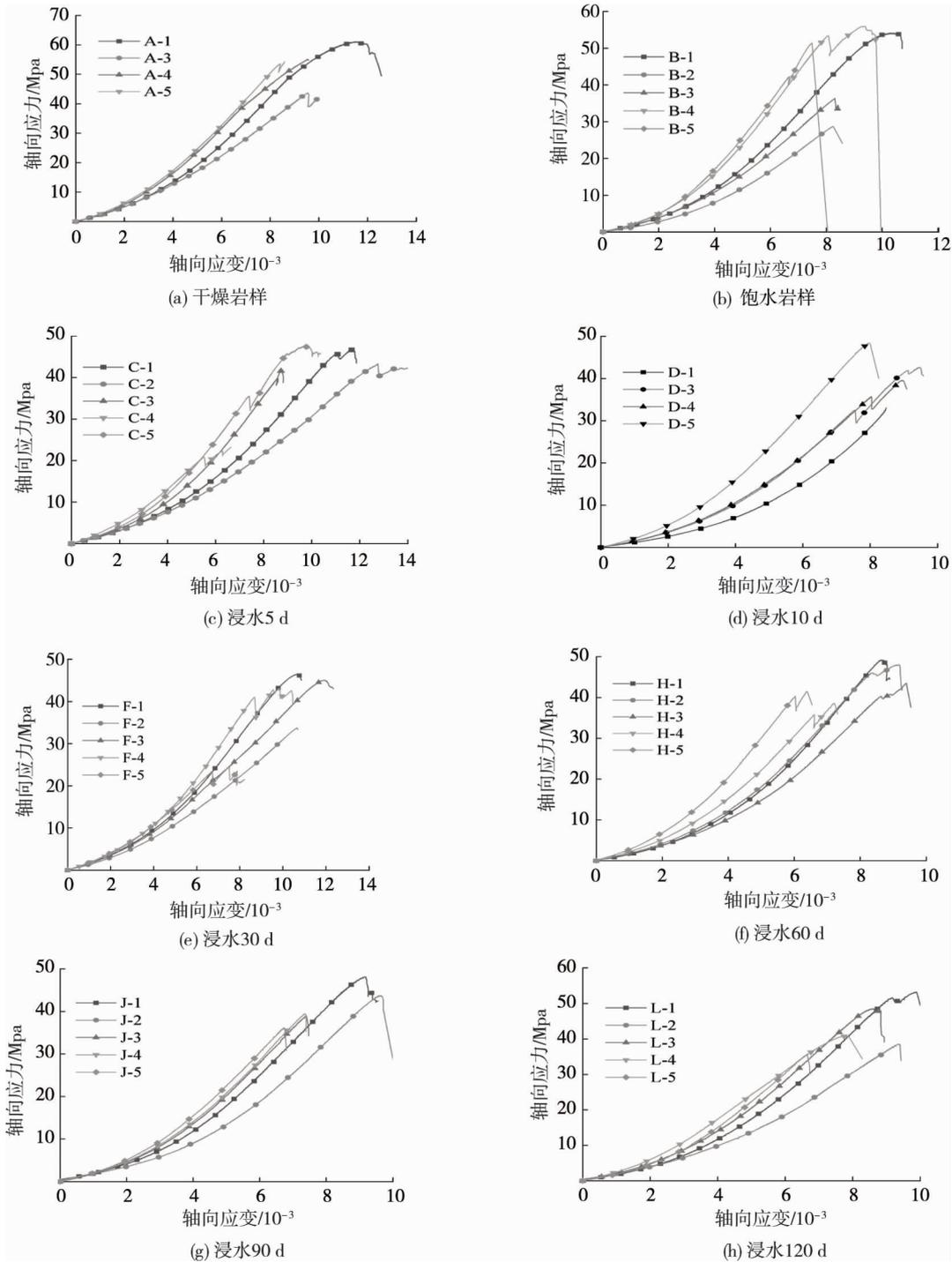


图5 不同浸水时间砂岩的应力-应变关系曲线

由图5可见,各组岩样在微裂隙压密阶段曲线的形状没有明显的差别,这是由于岩石在低应力状态下,其内部原始存在的裂隙逐渐愈合,这是岩石的一种固有属性.岩石饱水后,内部蒙脱石等泥质矿物吸水后体积膨胀为原体积的10~30倍^[23],对裂隙会产生一定的挤压作用,进而对岩石内部微裂隙的产生具有

一定的促进作用.通过对比不同浸水时间砂岩的应力-应变曲线可发现,微裂隙在压密阶段未产生显著变化,表明长期浸水对砂岩的初始微裂隙影响较小.岩样进入弹性变形阶段后,能量在岩样内部持续积聚.对图 5a~图 5h 进行对比分析后发现,随浸水时间的逐渐增加,弹性变形所对应的应变占比逐渐增大.当应力达到并超过岩石本身承载的极限时,内部会产生新的微裂隙,并逐渐扩大,此时岩石进入塑性变形阶段,在应力-应变曲线上表现为斜率变小.对比分析图 5 中的曲线可以看出,塑性变形阶段在岩石破裂失稳的 3 个阶段中变化最为明显,随浸水时间增加,塑性变形阶段逐渐减小.当浸水达到 10 d 时,岩样经过弹性变形阶段后,内部微裂隙会快速发展并相互贯通,从而导致塑性阶段变短,岩样呈现骤然破坏.

水对砂岩强度的影响较大,干燥状态时其抗压强度为 53.52 MPa,饱水后降低为 49.51 MPa,岩石的软化系数为 0.92;浸水 5, 10, 15 d 后,其强度值分别为 44.93, 43.08, 41.20 MPa,这表明,水对岩石强度产生持续的弱化作用且弱化作用较为显著;浸水时间为 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 d 时,强度分别为 42.11, 41.82, 41.19, 41.44, 39.21, 39.58, 39.73 MPa,这表明浸水时间超过 30 d 后,岩石强度虽总体呈下降趋势,但水岩耦合作用逐渐减小,强度趋于稳定.试验结果中存在浸水时间较长而岩石强度相对较高的情况,如浸水 45 d 的强度比浸水 30 d 的强度高 0.71 MPa,浸水 75 d 的强度比浸水 60 d 的强度高 0.25 MPa,这可能是由于岩石内部存在各向异性或人为操作误差等因素导致的,但总体而言,岩石强度随浸水时间的增加而降低.

3 声发射时域特征分析

当岩石内部产生新生微裂隙或旧裂隙扩展时,会产生微弱的声信号,可利用声发射仪器实时记录岩石在加载过程中内部微裂隙的发育情况.计数率、能率等声发射时域信息,可反映岩石裂隙发育和能量释放在时间上的变化特征.可通过声发射计数率反映岩石内部微裂隙发育在时间上的变化情况,通过能率反映声发射过程中能量的大小.本文主要从计数率、能率、累积计数和累积能量这 4 个参数进行分析,研究不同浸水时间的岩石加载过程中声发射信号随时间的变化规律.

通过分析浸水时间对岩石单轴抗压强度试验结果可知,浸水 10 d 内,水岩耦合作用对岩石强度产生较为明显的影响,而超过 15 d 后,这种影响逐渐减小并趋于稳定,但为观测长期浸水对砂岩岩样的影响,保证试验准确性,力学试验和声发射试验每浸水 15 d 进行一次,试验最长周期为 120 d.因试验数据较为庞大,受篇幅限制,在能够体现试验规律的前提下,对试验前期的干燥、初始饱水、浸水 5 d 和浸水 10 d 的声发射特征参数进行详细分析,对试验后期规律较为稳定的阶段,试验分析数据选用 30, 60, 90, 120 d 的声发射参数,对其进行综合分析,并选取各组中具有代表性的岩样进行详细分析,观察长期浸水对岩石声发射参数的时域信息的影响规律,所选代表性岩样可说明不同浸水时间声发射参数随加载过程的变化规律,其声发射累积计数和累积能量可能少于浸水时间更长的岩样.

3.1 干燥岩石声发射信号特征

岩样经烘干处理后,泥质矿物成分未受水的影响,此时岩石强度最高,加载过程中的声发射计数率、能率及累积计数、累积能量如图 6 所示.

由图 6 可见,干燥岩样在加载过程的阶段 A(微裂隙压密阶段)产生少量的声发射信号并释放较少的能量,声发射信号产生的原因是岩石内部原始微裂隙被压密.

岩样加载到阶段 B(弹性变形阶段)的后期时,计数率与能率均呈小幅增长,且计数率的增长幅度大于能率.因砂岩具有较大的颗粒结构,因此岩样在发生弹性变形时,内部颗粒结构相互挤压产生微量波动,这是该阶段产生声发射信号的主要原因.

岩样加载到阶段 C(塑性变形阶段)时,计数率与能率都呈指数增长.此时是由于岩石受载,导致岩石内局部达到承载上限,产生新生裂隙,并释放积蓄的能量,随加载逐渐进行,内部持续产生新生裂隙,并伴随着旧裂隙扩展,导致岩石声发射信号与能量的释放呈指数增长.

当加载到阶段 D(失稳破裂阶段)时,岩样发生宏观破坏.从应力-应变曲线可以看出,干燥岩样在阶段 D 有一定的时间持续产生大量的声发射信号,该阶段的能量释放也表现为持续大量释放,此时累积计数与累积能量都变为线性增长趋势,增长速度较快.这是由于岩石在轴向载荷下,受载压力超过岩石承受上限,内部微裂隙快速相互贯通,产生大量的声发射信号,并伴随能量大量且快速释放.

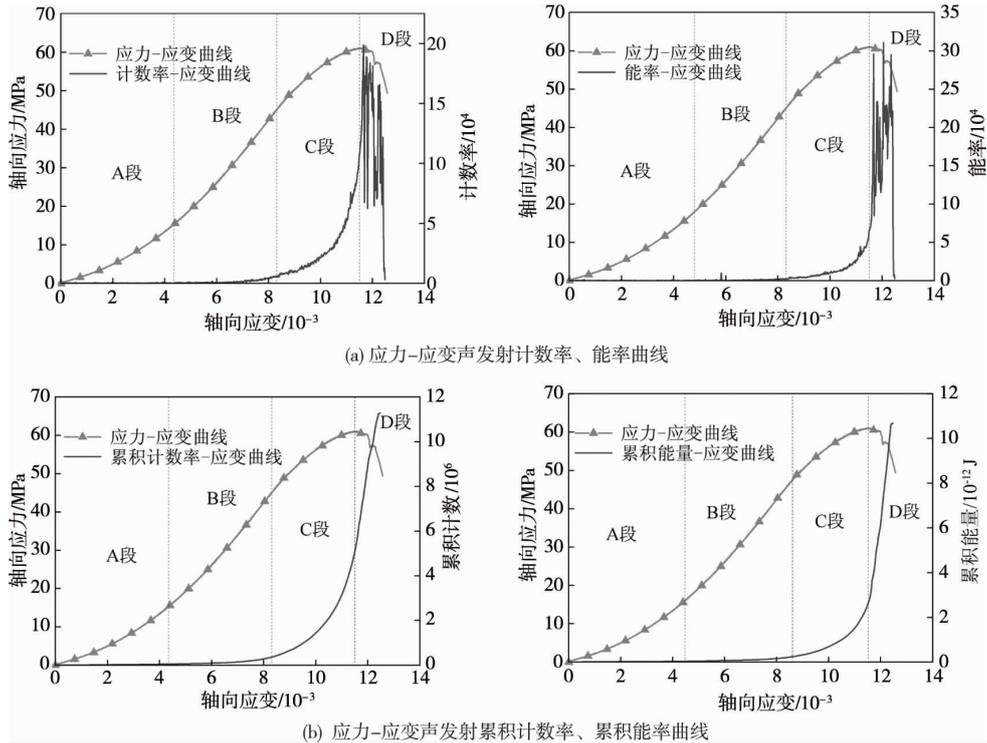


图 6 干燥岩样声发射参数变化曲线

3.2 饱水岩石声发射信号特征

对岩样进行含水处理后,水分通过原生微裂隙进入岩石内部,对岩石内泥质矿物成分产生软化、泥化作用,并降低了岩石内部分胶结物之间的相互作用力,导致岩石抗压强度显著下降.通过前述力学试验结果可知,砂岩饱水后,水岩耦合作用并未完成,水对岩样强度及声发射信号特征的影响随浸水时间的延长还将继续.加载过程中饱水岩样声发射计数率、能率、累积计数及累积能量较干燥岩样皆产生了显著变化,变化曲线如图 7 所示.

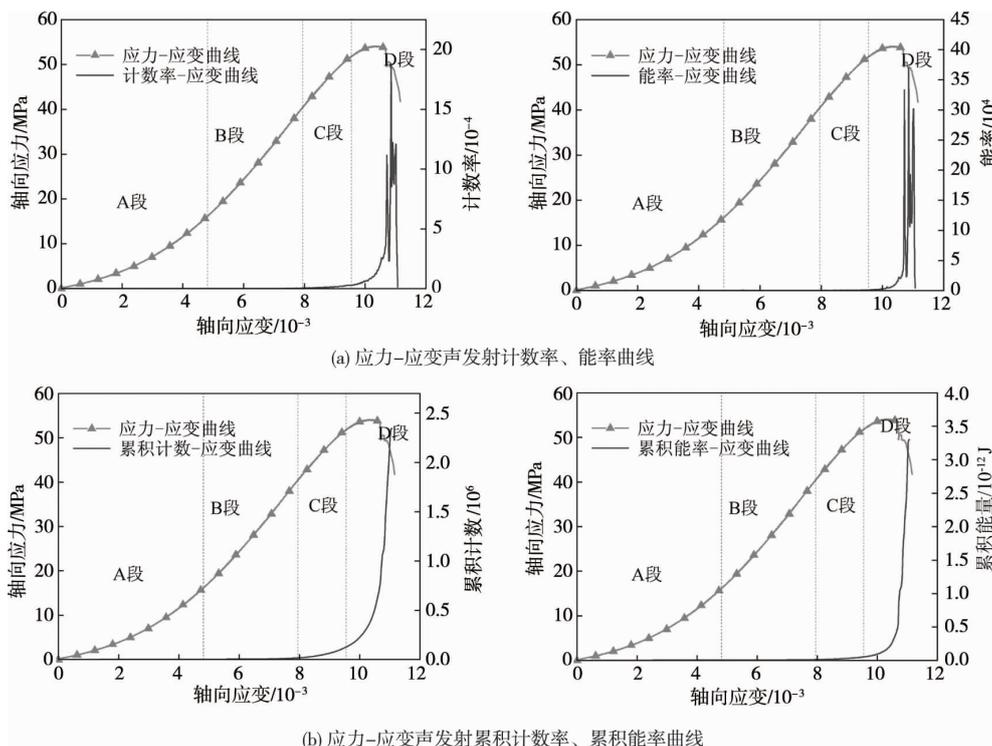


图 7 初始饱水岩样声发射参数变化曲线

对比分析图 7 与图 6 声发射计数率与能率曲线可以发现,初始饱水岩样的声发射特征参数较干燥岩

样发生了较大变化.初始饱水后的岩样在阶段 A 和阶段 B 未发现明显的声发射信号,是因为水在岩石内部起到了润滑作用,岩石受润滑作用影响使岩石在压密和弹性变形时产生的声波较小,岩石受软化作用影响导致声波信号在砂岩内部传播时衰减较快,通过润滑和软化双重作用的影响,使声发射设备的接受探头在岩石表面监测到的声波信号极少.

与干燥岩样相比,初始饱水岩样塑性阶段的应变量较干燥岩样有所减少,该阶段声发射计数率与能率皆呈上升趋势,累积计数与累积能量表现为指数型增长,表明初始饱水砂岩在塑性变形阶段,其内部裂隙的扩展规律与干燥砂岩具有相似性;当应力达到抗压强度时,岩石内部声发射信号活动剧烈,在阶段 D,计数率产生一个较大峰值,而能率则产生多个峰值,累积计数与累积能量皆表现为阶跃式快速增长,与干燥砂岩相比,饱水砂岩的总计数与总能量显著减小,饱水岩样声发射累积计数和累积能量分别为干燥岩样的 20.8% 和 30.9%,表明砂岩浸水对声发射信号产生较大影响.

3.3 浸水 5 d 岩石声发射信号特征

饱水砂岩经过 5 d 的浸水后,其含水率趋于稳定,而塑性变形的占比进一步减小,强度进一步降低,声发射计数率与能率较前一阶段也发生了一定的变化,如图 8 所示.

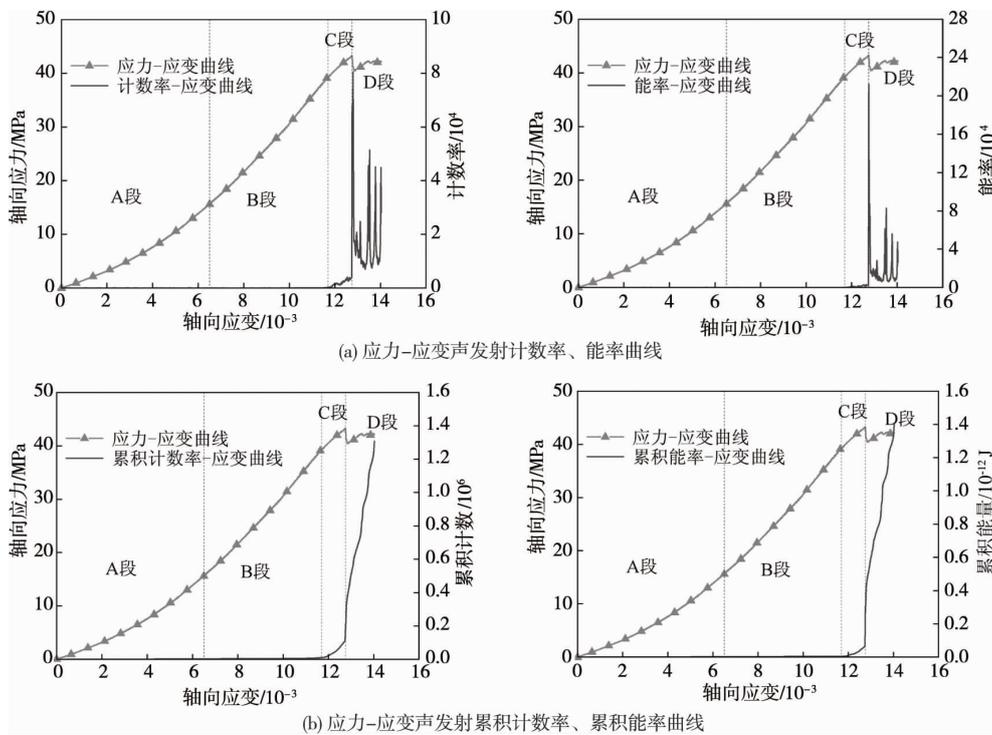


图 8 浸水 5 d 岩样声发射参数变化曲线

由图 8 可见,砂岩浸水 5 d 后,阶段 A 和阶段 B 基本无声发射信号产生,与初始饱水状态相比,这两个阶段声发射信号的数量及强度明显降低,这是因为水岩耦合作用降低了声波信号的产生;阶段 C 的应变量显著减小,计数率与能率开始上升,声发射信号逐渐活跃,这表明岩石内部开始出现新生裂隙,累积计数和累积能量都为指数型增长,但能率上升速率慢于计数率;阶段 D 岩石内部产生大量声发射信号并伴随能量的急剧释放,计数率与能率曲线中出现一个较大峰值,随后裂隙发育有所减缓,随应力的逐渐增大,计数率与能率表现为间断式峰值,表明岩石在能量积蓄到一定程度后,进行集中释放,累积计数和累积能量曲线在阶段 D 呈阶梯式快速增长.

3.4 浸水 10 d 岩石声发射信号特征

随浸水时间的增加,塑性阶段应变量继续减少,在应力-应变曲线上很难将其与弹性变形阶段进行区分,因此在对浸水 10 d 以后的曲线不再划分加载过程的 4 个阶段.浸水 10 d 后其计数率、能率、累积计数和累积能量曲线如图 9 所示.

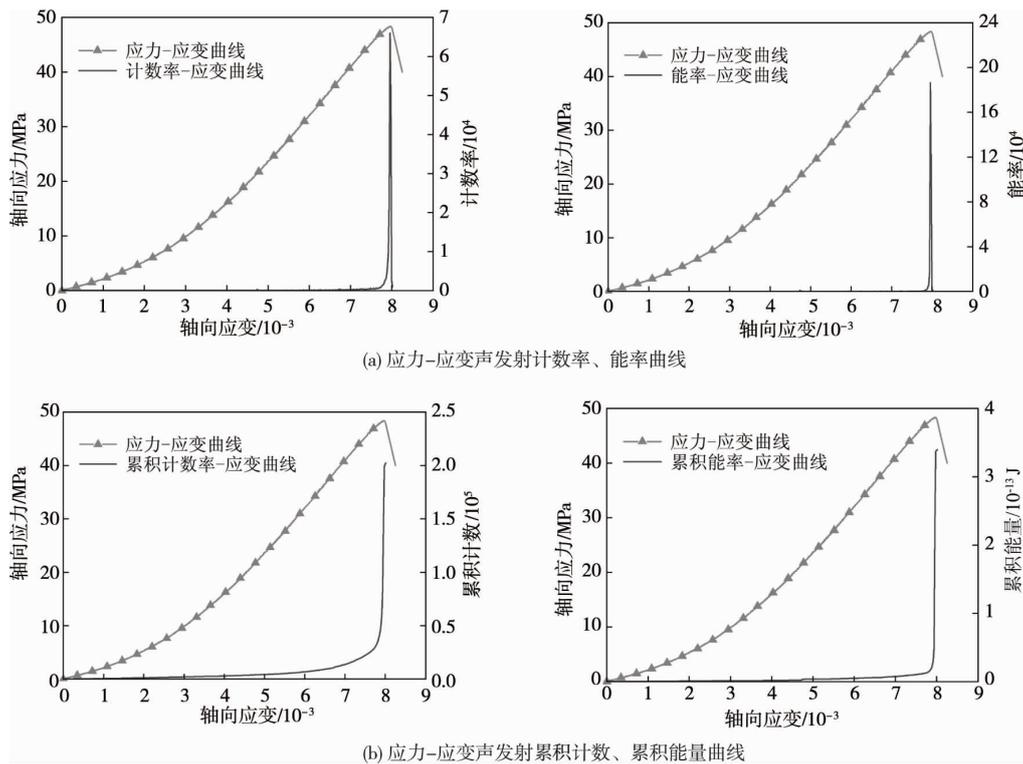


图9 浸水10 d岩样声发射参数变化曲线

饱水砂岩持续浸水10 d后,水岩耦合作用导致岩石强度进一步降低,在岩石破裂前,声发射信号极少,仅在试件破裂前较短的应变量中声发射信号较为活跃,计数率和能率都产生小幅度上升.当应力达到试件峰值强度时,计数率和能率都在瞬间出现一个较大峰值,岩石内部微观裂隙快速产生、发育并相互贯通,在岩石试件进入失稳破裂阶段后,声发射计数率和能率归于平静.

3.5 长时间浸水岩石声发射信号变化特征

砂岩经过长时间浸水后,水岩耦合作用逐渐趋于稳定,力学性质弱化逐渐减缓,声发射参数变化特征也逐渐趋于稳定,因此,将浸水30,60,90,120 d这4组饱水岩样的声发射计数率与能率进行综合分析,总结其变化规律,具体见图10.

综合分析浸水30~60 d的试验结果可以发现:砂岩经过长时间浸水后,在加载过程中产生极少的声发射信号,仅在破裂时产生大量声发射信号,在计数率与能率的曲线中仅出现一个较大峰值,在试件失稳破裂后,声波信号又趋于平静,说明岩石长时间浸水可缩短岩石在加载过程中内部微裂隙的发育过程,相对增大岩石的弹性变形能力,导致裂隙发育与能量释放具有集中性,岩石的破裂具有突发性.从计数率和能率曲线图可以看出:岩样在破坏前,都存在裂隙发育阶段,此时声发射信号开始活跃;随浸水时间的逐渐增加,裂隙发育阶段的应变量呈减小趋势,其中在浸水60 d和120 d的能率曲线中裂隙发育阶段已然消失,但在计数率曲线中还有所体现.

长时间浸水后岩样的声发射累积计数和累积能量在岩样破裂前都有大幅增长.由于声发射的总累积计数与总累积能量数值随浸水时间的延长而减少,导致岩样在破裂前产生的累积计数与累积能量的占比增加.在微裂隙压密阶段与弹性变形阶段产生一定数量的累积计数与累积能量,表明岩石含水后仅造成声发射信号的减少,未能完全消除声波信号,这是由于试件为非均质固体,在压缩过程中内部颗粒必然会产生相互摩擦,从而形成声发射信号;另外含水砂岩在受载过程中,水在岩石内部产生流动,部分水会逐渐被挤压出来,从而产生微小声波震动.

3.6 浸水时间对岩石声发射特征影响综合分析

综合分析图6~图10的声发射参数曲线可以看出:

1) 在微裂隙压密阶段和弹性变形阶段,干燥岩样在计数率中具有少量的声发射信号,主要是内部存在微裂隙压密,导致岩石内部颗粒摩擦.而初始饱水岩样与不同浸水时间的岩样基本未产生明显的信号,

是由于水在岩石内部产生了润滑作用,减少了岩石内部颗粒间摩擦产生的声发射信号,水在岩石内部还可使泥质矿物成分软化,产生一定的减震作用,导致较小的声发射信号无法传播到试件表面,声发射探头无法接收。

2)在塑性变形阶段,声发射计数率与能率开始逐渐增长,表明岩石内部开始产生新生微裂隙,并使旧裂隙扩展及相互贯通.干燥岩样在失稳破坏前,具有较长时间的裂隙发育期;岩石饱水后,塑性变形阶段的应变变量减小,并随浸水时间的逐渐增加,塑性变形阶段的应变变量持续减小.在浸水 10 d 后,塑性变形阶段开始不易划分;当浸水时间达到 90 d 和 120 d 时,从能率曲线中可以看出,塑性变形阶段未产生能量释放,表现为在失稳破坏时能量的骤然释放。

3)在岩样失稳破裂时,计数率和能率都出现一个峰值,此时裂隙大量出现并相互贯通,从而形成岩样的宏观破坏.干燥岩样在破裂阶段具有一定的持续时间,计数率与能率会在最大峰值后产生多个较小峰值,表明能量释放时产生的裂隙具有集中性,呈间歇性释放;砂岩饱水后破裂阶段持续时间减小,但计数率与能率的变化特征与干燥岩样相似,出现多个较小峰值,呈间歇性释放;随浸水时间逐渐增加,失稳破裂阶段逐渐消失,在浸水 90 d 和 120 d 时,计数率与能率都只产生一个最大峰值。

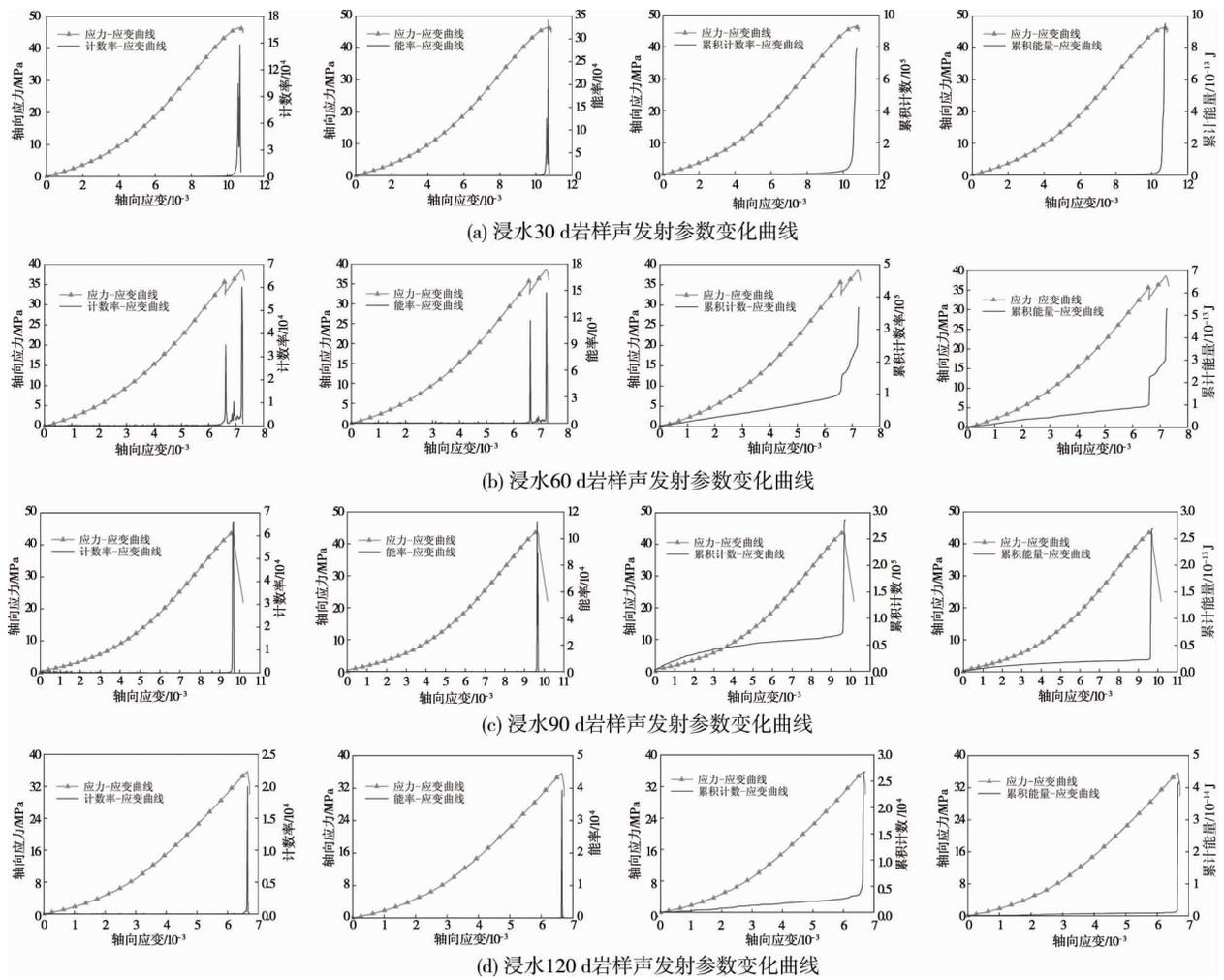


图 10 浸水 30,60,90,120 d 饱水岩样声发射参数变化曲线

从图 6~图 10 的累积计数和累积能量曲线可以看出,随浸水时间的逐渐增加,声发射累积计数与累积能量均呈降低趋势,将其汇总后绘制如图 11 所示的柱状图。

图 11 可直观地反映浸水时间对岩石声发射信号的影响规律,岩样饱水后声发射信号总量降低数值最大,浸水 120 d 后,声发射累积计数和累积能量分别为干燥岩样的 0.24% 和 0.39%,表明岩石含水后,水对岩石产生了润滑作用,使砂岩岩样内部裂隙在发育扩展时,减少了声发射信号;水在岩石内部使泥质矿物成分软化,导致声发射信号在传播过程中衰减速度加快.通过水对岩石弱化作用的影响,造成声发射信号

显著减少,之后随浸水时间的增加,降低趋势逐渐减缓,在浸水 10 d 后,产生较低的总计数和总能量.岩石本身的差异性和试验过程产生的误差等因素对声发射参数也会产生一定的影响.

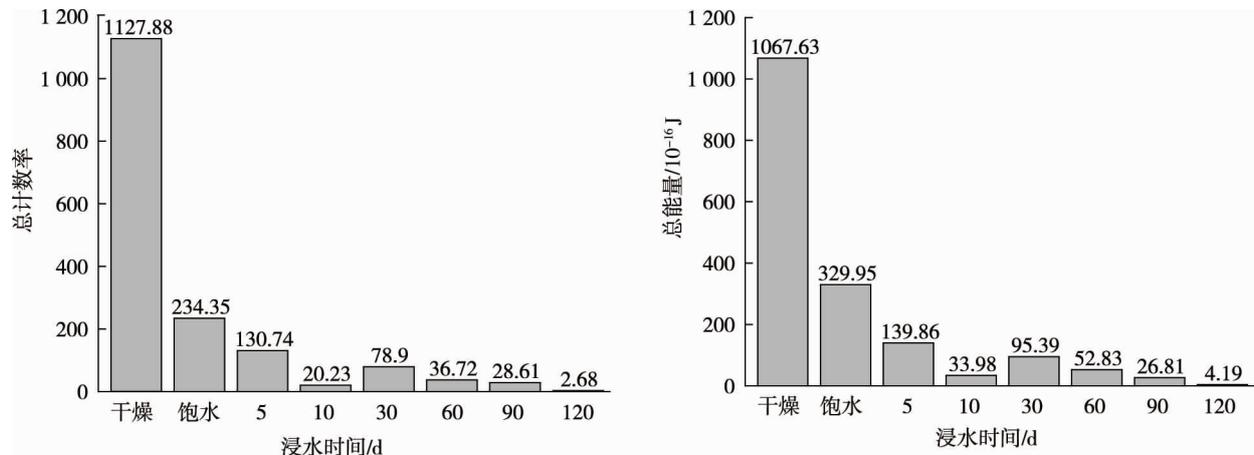


图 11 总计数与总能量累积数柱状图

声发射累积计数和累积能量随浸水时间增加,总量呈减少趋势,导致浸水 10 d 以后的岩样,在累积计数和累积能量的微裂隙压密阶段与弹性变形阶段出现显著上升趋势,表明岩石浸水并不能完全消除塑性变形阶段前的声发射信号,只起到削减和衰弱作用,导致含水岩样的计数率和能率曲线在该阶段仅产生少量声发射信号.

4 结论

1) 水对含泥质矿物砂岩的抗压强度具有显著影响.干燥状态时其强度为 53.52 MPa,饱水后强度降低为 49.51 MPa,软化系数为 0.92;浸水 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 d 时饱水砂岩的强度分别为 44.93, 43.08, 41.2, 42.11, 41.82, 41.19, 41.44, 39.21, 39.58, 39.73 MPa;浸水 120 d 后,软化系数降低到 0.74.

2) 含水状态与浸水时间对含泥质矿物砂岩声发射信号的产生具有显著影响.初始压密与弹性变形阶段,干燥岩样声发射信号的数量与强度均高于饱水及不同浸水时间的岩样,且随浸水时间的增加,声发射信号数量与强度均呈降低趋势;岩样在破裂前存在微裂隙快速发育阶段,声发射信号开始活跃并迅速增长,随浸水时间的增加,信号活跃增长期的应变量逐渐减少,浸水 90 d 后,岩样破裂前能率增长期基本消失,表现为失稳破坏时的骤然释放.

3) 长时间浸水除导致含泥质矿物砂岩在加载过程中裂隙发育和能量释放具有集中性外,还对声发射信号的累积计数和能量产生重要影响.饱水岩样声发射累积计数和累积能量分别为干燥岩样的 20.8% 和 30.9%;随浸水时间的增加,岩石在破裂过程中的声发射信号会持续减少,浸水 120 d 后,声发射累积计数和累积能量分别为干燥岩样的 0.24% 和 0.39%.

参考文献:

- [1] 夏冬,吴朝松,杨天鸿,等.围岩强度弱化对堵水帷幕稳定性影响的数值模拟研究[J].煤炭学报,2019,44(s1):220-230.
- [2] 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.
- [3] 邓华锋,肖志勇,李建林,等.水岩作用下损伤砂岩强度劣化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(s1):2690-2698.
- [4] 朱珍德,邢福东,王思敬,等.地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(s2):4739-4743.
- [5] 熊德国,赵忠明,苏承东,等.饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):998-1006.
- [6] 贾海梁,王婷,项伟,等.含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J].岩石力学与工程学报,2018,37(7):

1618-1628.

- [7] ERGULRT Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(2): 355-370.
- [8] ROY D G, SINGH T N, KODIKARA J, et al. Effect of water saturation on the fracture and mechanical properties of sedimentary rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(10): 2585-2600.
- [9] 李帅军, 冯夏庭, 徐鼎平, 等. 天然和饱水状态 B 类角砾岩的力学性质及其对地下厂房稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(8): 1530-1542.
- [10] 邓华锋, 胡安龙, 李建林, 等. 水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J]. *岩土力学*, 2017, 38(3): 631-639.
- [11] 崔凯, 吴国鹏, 王秀丽, 等. 不同水岩作用下板岩物理力学性质劣化实验研究[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(6): 1045-1052.
- [12] 许江, 吴慧, 陆丽丰, 等. 不同含水状态下砂岩剪切过程中声发射特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(5): 914-920.
- [13] 秦虎, 黄滚, 王维忠. 不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1115-1120.
- [14] 夏冬, 杨天鸿, 徐涛, 等. 饱水时间对饱水岩石损伤破坏过程中声发射特征影响的试验[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(s2): 337-345.
- [15] 黄智刚, 左清军, 吴立, 等. 水岩作用下泥质板岩软化非线性机制研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2931-2942.
- [16] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 浸泡作用下砂岩断裂力学特性及劣化机理[J]. *中国地质大学学报*, 2014, 39(1): 108-114.
- [17] YAO Q L, CHEN T, JU M H, et al. Effects of water intrusion on mechanical properties of and crack propagation in coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(12): 4699-4709.
- [18] 李涛, 赵建军, 解明礼, 等. 饱水时间对板岩物理力学特性劣化影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(6): 217-222.
- [19] 吴朝松, 夏冬, 贾清斐, 等. 水岩耦合作用下研山铁矿东帮顺倾边坡稳定性研究[J]. *矿业研究与开发*, 2019, 39(6): 47-52.
- [20] 谢云鹏, 陈秋南, 黄小城, 等. 深埋隧道炭质板岩微观结构及单轴压缩试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(1): 96-102.
- [21] 尹晓萌, 晏鄂川, 王鲁男, 等. 水与微观结构对片岩波速各向异性特征的影响及其机制研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(6): 2221-2230.
- [22] 李海龙, 白海波, 钱宏伟, 等. 含水煤层底板岩层力学性质分析: 以小纪汗煤矿为例[J]. *采矿与安全工程学报*, 2016, 33(3): 501-508.
- [23] BAYESTEH H, MIRGHASEMI A A. Numerical simulation of pore fluid characteristic effect on the volume change behavior of montmorillonite clays[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 48: 146-155.