

不同含水率泥质粉砂岩破裂声发射特性试验研究*

张安斌^{1, 2, 3}, 刘祥鑫², 张艳博², 田宝柱²

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北唐山 063009; 3. 中国核工业集团地质矿产事业部, 北京 100013)

摘 要:以干燥、自然和饱和含水3种典型状态的泥质粉砂岩为研究对象,进行单轴压缩破坏全程声发射检测试验,研究了3种状态下岩石破裂的力学和声发射特性的不同。研究结果表明:含水使得泥质粉砂岩软化,且峰值应力和弹性模量均随含水率的增加而减小,变形特征由脆性逐渐向延性转化;声发射累计事件数、声发射事件率峰值、声发射累计绝对能量、声发射绝对能率峰值等声发射参数均随含水率的增加而减少,即含水使得泥质粉砂岩损伤破裂程度减小,破裂全程能量释放水平降低;根据试验所得声发射累计事件数和累计绝对能量随时间变化曲线,得出含水率使得泥质粉砂岩由“突变型”的脆性破坏向“平稳型”的延性破坏过渡。

关键词: 岩石力学; 泥质粉砂岩; 不同含水率; 声发射; 绝对能量

中图分类号: O319.56 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)03-0591-07

Experimental Research on Acoustic Emission Characteristics of Argillaceous Siltstone Failure under Different Moisture Contents

Zhang Anbin^{1,2,3}, Liu Xiangxin², Zhang Yanbo², Tian Baozhu²

(1. Faulty of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, P. R. China;
2. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063009, P. R. China;
3. Department of Geology & Mining, CNNC, Beijing 100013, P.R.China)

Abstract: The uniaxial compressive and the acoustic emission (AE) tests have been taken on different moisture of argillaceous siltstone, including the state of dry, natural and saturated. The difference of rock rupture mechanics characteristics and AE characteristics on three moisture contents has been developed. The results show that the presence of water makes argillaceous siltstone softening damage intensity, the peak stress and elastic modulus decrease with the increase of the water content, the characteristic of deformation transfer form brittle to ductile; AE accumulative events, AE events rate peak, AE accumulative absolute energy and AE absolute energy rate peak decrease with the increase of the water content, namely the presence of water makes the damage or broken degree of argillaceous siltstone decrease, and the energy release level in whole failure of rock reduce; According to the curves of AE accumulative events and AE accumulative absolute energy changing with time, it turns out that the presence of water makes the failure of argillaceous siltstone transfer form the brittle type of sudden to the ductile of stable.

Keywords: rock mechanics; argillaceous siltstone; different water moisture; acoustic emission; absolute energy

* 收稿日期: 2016-07-11(修改稿)

作者简介: 张安斌 (1989-), 男, 河北邯郸人, 硕士生, 主要从事矿山岩石力学方面的研究。E-mail: zabheut@126.com

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (201210081001); 河北省教育厅自然科学基金 (QN2014067); 教育部高校博士学科专项科研基金 (20120023110023); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2014QZ03)

0 引言

岩石在载荷作用下发生破坏,这主要与裂纹的产生、扩展及断裂过程有关。在裂纹的形成与扩展过程中,储存的部分能量会以弹性应力波的形式突然释放出来,这种现象就是声发射(acoustic emission, AE)。通过对岩石声发射信息进行处理、分析和研究,可推断岩石内部的形态变化,反演岩石的破坏机制^[1]。因此,声发射已广泛用于地下采矿、露天边坡和隧道涵洞等岩石工程,甚至在石油勘探和地震监测等领域都有涉及,且已取得一些有意义的成果^[2-7]。然而岩石的物理力学性质与其所处的地质条件 and 环境密切相关,其中,由于降水、地下水以及裂隙水等过程中产生的水环境影响极易造成岩石遇水质变而带来诸多不利甚至灾害,如巷道变形、矿井突水、边坡滑移、大坝溃堤以及隧道坍塌等。国内外众多学者开展了水对岩石的各个方面的影响研究。例如, Hawkins 等^[8]研究了岩石的抗剪强度与含水量之间的关系;孟召平等^[9]进行了不同含水条件下不同沉积岩的单轴压缩试验,得出沉积岩受力过程中储存的弹性应变能和冲击倾向性均随含水量的增加而显著降低。刘善军等^[10]对不同含水情况的砂岩进行了红外辐射试验,通过利用含水岩石破裂瞬间的热像变化特征,分析了岩石灾变的空间位置与灾变模式。

利用声发射来探究水对岩石性能影响的试验工作也在逐步增多。许江等^[11]通过对不同含水状态砂岩的声发射特征参数与剪应力的关联分析与研究,得出不同含水率的砂岩的剪切过程的声发射特征是不同的。秦虎等^[12]通过自制的煤岩固-气偶耦合细观力学试验装置,对不同含水率的煤样开展了声发射特征试验,分析了干燥与不同含水率煤岩的声发射特征的区别。李健等^[13]利用双轴伺服控制系统进行了自然和饱和含水状态下的花岗岩岩爆声发射模拟实验,得出自然状态下花岗岩的声发射事件率平静期比饱和状态下平静期稍长,但饱和和花岗岩的声发射平均事件率要比自然状态花岗岩高,即水对花岗岩岩爆是有影响的。

关于含水岩石受力灾变的发展过程中的声发射异常特征及其规律性探索,以上研究所选试样种类繁杂、侧重点不同、试验方法各异,且所得结论并

不能全面地反映客观事实。因此笔者选择受水影响较大的泥质粉砂岩,通过对干燥、自然和饱和含水 3 种典型含水状态的试样进行单轴压缩声发射检测试验,以研究不同含水状态下泥质粉砂岩的力学及声发射特性的不同,以期对岩石破裂失稳的预测提供理论及技术支持。

1 试验过程

1.1 试验设备

试验设备主要有加载系统和声发射监测系统两部分组成。试验系统装置如图 1 所示。

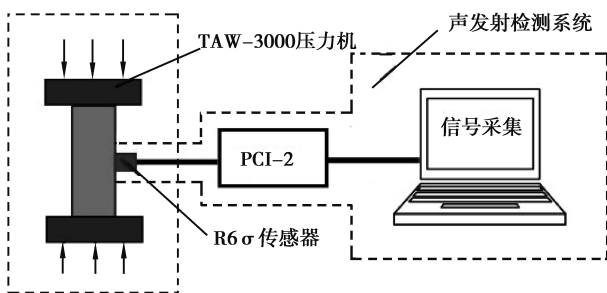


图1 岩石声发射试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock AE experimental system

试验中采用的加载系统是由长春市朝阳试验仪器有限公司生产的型号为 TAW-3000 电液伺服岩石试验机,声发射检测系统采用美国物理声学公司 PAC 生产的 PCI-2 型全数字化声发射监测系统。试验过程中,泥质粉砂岩微破裂产生的声发射信号由声发射检测系统实时记录并显示声发射的测定数据曲线,泥质粉砂岩所受的轴压则由 TAW-3000 电液伺服岩石三轴试验机单独自动施加并记录数据。

1.2 岩样制备

在泥质粉砂岩的加工中,严格按照《工程岩体试验方法》,将取自江西赣南某采石场的泥质粉砂岩切割成 50 mm×50 mm×100 mm 的长方体标准试件,并对切割好的泥质粉砂岩用细砂纸进行打磨,保证断面的平行度控制在±0.02 mm 以内,端面与轴线的垂直偏差不超过±0.25°。试件的含水状态处理如下:①干燥状态:将试件置于 105 ℃ 的电热鼓风干燥箱内干燥 48 h;②自然状态:将直接取自采石场深处的岩样用保鲜膜包裹;③饱和状态:采用自由浸水法,将试件放入水槽先注水至试件高度的 1/4 处,以后每隔 2 h 分别注水至试件高度的 1/2

和 3/4 处,6 h 后全部浸没试件,48 h 后拭去表面的水分^[14]。

1.3 实验加载方案

试样的单轴压缩采用等位移控制方式加载,其速率控制在 0.2 mm/min。同时,采用美国 PCI-2 型声发射检测仪采集岩样在单轴压缩下破坏全过程的声发射信号。根据经验,前置放大器提供 40 dB 固定增益,检测门槛设为 40 dB。选用 R6a 型谐振式高灵敏度传感器,工作频率范围为 35~100 kHz,采样频率为 1M 次/s。为保证传感器与试件之间的耦合度,传感器与试件之间涂抹一层凡士林,再用胶带将其固定。

2 试验结果及分析

2.1 不同含水泥质粉砂岩力学特性分析

岩样在单轴压缩下的全应力-应变曲线可以直观反映岩样受力过程中的应力-应变特性。根据 TAW-3000 伺服加载试验机记录的数据,绘制出不同含水泥质粉砂岩的应力-应变曲线,如图 2 所示。

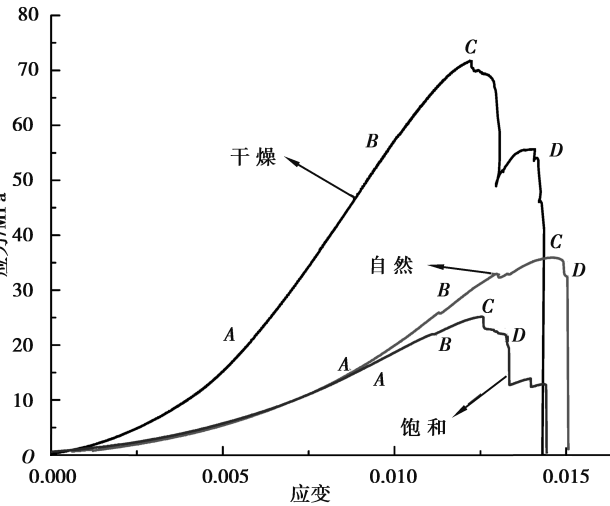


图 2 不同含水泥质粉砂岩的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of argillaceous siltstone under different moisture contents

从图 3 观察得到泥质粉砂岩单轴受压破坏全程均可分为裂隙压密阶段(OA),线弹性阶段(AB)、塑性屈服阶段(BC)和破坏阶段(CD)。但是随着泥质粉砂岩含水状态不同,其破坏演化特征是有所不同的:干燥状态下,初始压密时曲线上凹程度较小,峰值前几乎呈线性增长,即线性弹性阶

段的标志,此时取应力与应变的比值为弹性模量,峰后下降又上升是残余承载的原因。自然状态下,裂隙压密阶段变形占整个变形量比重较大,弹性阶段持续时间短;由于新裂纹的突然形成与破裂,产生的应力瞬间不稳定,峰前有短暂的波动。饱和含水状态下,弹性阶段几乎不存在,试件变形的总位移量最小;峰值之后波动较为剧烈,这是破坏之后的试件出现变形较大而出现重复加载的原因。

分析整个岩石破裂全程,干燥试件破裂时,在端部出现大量岩屑的崩落和弹射,在主裂纹贯通时伴有较大声响,出现典型的“X”形剪切破坏,属于脆性破坏;自然试件破坏过程则较为平缓,只有部分侧面岩块的脱落,破坏前有几次微裂纹的贯通,有脆性向延性过渡的趋势;饱水试件在受压过程几乎没有碎屑崩落,出现较为平静的拉伸破坏,延性特征表现显著,发生主破裂的声音较低沉浑厚。

再者,含水使得岩石内部颗粒间部分胶结物溶解,削弱了颗粒间的摩擦力,加上水的溶蚀作用,使岩石内部出现微孔洞、微裂隙,内部微观结构变得松散,进而导致岩石强度和弹性模量等力学参数随含水率的增加而降低,即水对泥质粉砂岩有软化作用,如表 1。

表 1 不同含水泥质粉砂岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of argillaceous siltstone under different moisture contents

试件	尺寸/mm	含水率	峰值应力/MPa	弹性模量/GPa
干燥	46.90×50.10×97.16	0%	71.69	9.17
自然	48.20×49.60×100.10	1.41%	35.93	4.71
饱和	48.76×49.90×100.50	4.13%	25.16	3.21

2.2 不同含水泥质粉砂岩声发射事件特征分析

由一个或几个波击可鉴别所得声发射事件的个数,可分为事件率和累计事件数,能表明泥质粉砂岩内部裂纹形成、扩展产生的频度和总量。根据 PCI-2 型声发射检测系统采集数据,绘制了 3 种状态下泥质粉砂岩的应力、AE 事件率和累计 AE 事件数随时间变化曲线,如图 3(a)~(c)所示,且将声发射事件有关参数统计于表 2。

表 2 不同含水水泥质粉砂岩的声发射事件参数对比

Table 2 AE event parameter comparison of argillaceous siltstone under different moisture contents

试件	AE 平均事件率/(次·s ⁻¹)				AE 事件率 峰值(次·s ⁻¹)	累计 AE 事件数/次	峰值应力 时间/s	AE 率峰值 时间/s	时间 差/s
	压密 阶段	弹性 阶段	屈服 阶段	破坏 阶段					
干燥	144	423	592	370	990	129 961	370	358	-12
自然	44	156	398	487	793	94 271	575	596	21
饱和	34	68	124	96	740	38 589	520	552	32

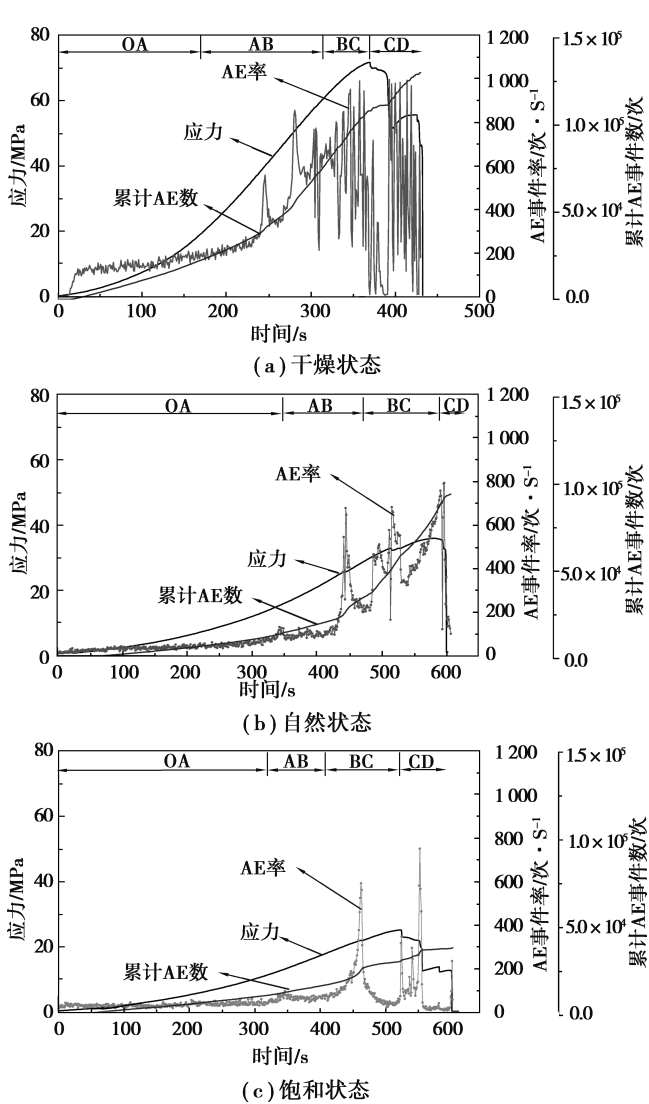


图 3 不同含水水泥质粉砂岩时间-AE 事件-应力关系曲线
Fig. 3 Time-AE count-stress curves of argillaceous siltstone under different moisture contents

从图 3 中可以看出,泥质粉砂岩在受压破坏全程均有声发射信号产生,声发射事件率变化特征与岩石应力变化趋势有较好的一致性,即可反映泥质粉砂岩内部受压破裂失稳的演化规律。结合表 2 可知,声发射事件数特征均随含水率的增加表现出

降低的趋势,具体分析如下:

(1)在初始裂隙压密阶段,声发射信号普遍较少,平均声发射事件率不高,累计声发射计数曲线较为平缓。对比分析可知,干燥试件产生的声发射较多,且出现从无到有的突增,持续时间短,主要由于经过干燥后粉砂岩颗粒变得坚硬,结构致密,内部出现裂隙闭合时颗粒摩擦或者滑移而产生的声发射信号;自然及饱和试件含水之后,岩石颗粒软化,泥质胶结物被溶解,声发射信号比较少,平均声发射事件率较低,此阶段持续时间较长。

(2)在线弹性阶段,主要发生的是弹性变形,声发射总数持续增长,属于典型的“稳定增长期”。但由于干燥脱水,在相同载荷之下干燥试件的变形较大,因此,出现声发射信号大幅增加,声发射事件总数最多。相反,自然及饱和试件的声发射信号增幅较小,声发射平均事件率仅为干燥试件的 36.8% 和 16%。

(3)在塑形屈服阶段,由于受压裂纹萌生且急剧扩展增加,声发射信号频繁活跃。干燥试件声发射事件率曲线持续波动,且声发射水平相对较高;自然试件声发射事件率曲线伴随峰值应力曲线的波动而出现阶跃,直到达到峰值;而饱和试件因含水率最大,塑形增强,只出现一次陡增,之后便沉寂。

(4)在破坏阶段,因主裂纹的贯通而破坏,声发射事件率出现峰值之后便随应力的急剧下降而下降,出现衰落期。声发射事件率的峰值随着含水率的增加而降低,且声发射峰值应力较应力峰值出现滞后现象,滞后的时间差随含水率增加而加大。干燥试件因峰值应力之后的次生裂纹的贯通而出现声发射信号的波动,自然试件因此阶段经历时间短暂而平均声发射事件率最高,饱和试件声发射事件率的峰值则出现在峰值应力之后,衰落期最为显著。

为了进一步分析声发射事件数特征因含水率不同而表出的特征,绘制了 3 种状态下岩石累计声发射事件数的对比图,为了便于比较,横坐标取归一化的相对时间^[15]。

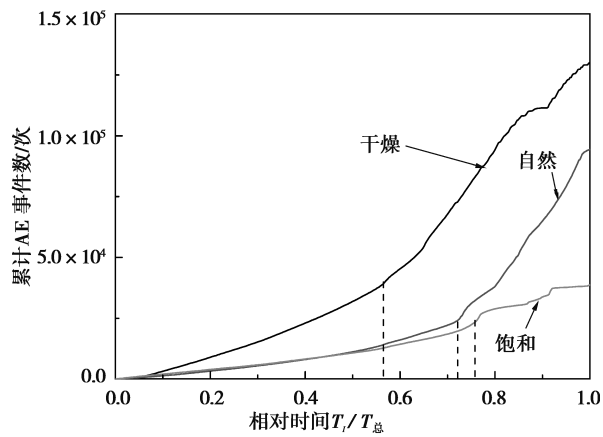


图4 不同含水泥质粉砂岩累计 AE 事件数对比

Fig. 4 AE cumulative events comparison of argillaceous siltstone under different moisture contents

从图4和表2可以看出,泥质粉砂岩的累计声发射事件数随着含水率的增加而减少,其中,自然试件累计声发射事件数为干燥试件的72.5%,饱和试件仅为29.7%。分析累计声发射事件数曲线变化趋势可以看出:干燥和自然试件有明显的曲线突增,且均有一段大致线性增长直至岩石完全破裂,显现出脆性破坏,可归为“突发型破裂”;饱和试件则不然,曲线突增趋势不明显,缓慢增长,可归为“平稳型破裂”。再者,对比曲线开始出现突增的时间点,可以看出随着含水率的增加,曲线突增出现了滞后。

2.3 不同含水泥质粉砂岩声发射能量特征分析

声发射能量定义为信号幅度的平方与时间的乘积,与信号幅度和仪器的增益有关,绝对能率是指单位时间内观测到全部事件的声发射的总和,根据需要,取1 s为单位时间^[16]。

本文中选取了声发射绝对能率和声发射累计绝对能量两个参数,以此来反映不同含水状态泥质粉砂岩内部破裂过程中能量的释放以及破裂演化特征。根据PCI-2型声发射检测系统采集数据,绘制了3种状态下泥质粉砂岩的应力、AE绝对能率和累计AE能量随时间变化曲线,如图5(a)~(c)所示,且将声发射能量有关参数统计于表3。

从图5可以看出,泥质粉砂岩受载破坏全程声发射能率曲线与其应力曲线同样有较好的一致性,能反映泥质粉砂岩破坏全程能量释放演化规律。结合表3不难发现,泥质粉砂岩的声发射能量随含水率的增加呈现出降低的变化趋势,具体分析如下:

(1)在初始裂隙压密阶段,发生的都是小事

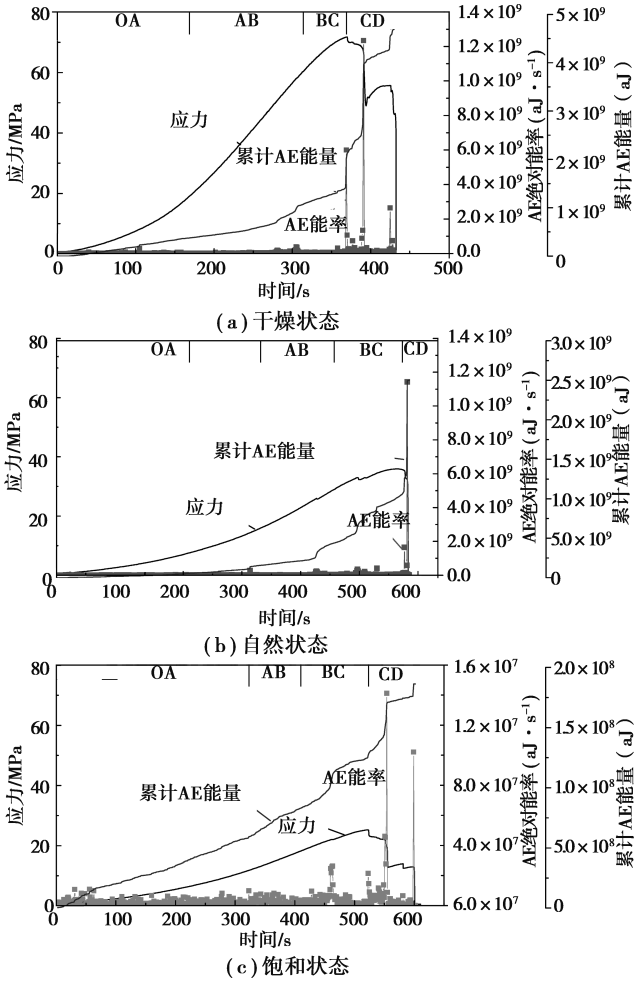


图5 不同含水泥质粉砂岩时间-AE绝对能量-应力关系曲线

Fig. 5 Time-AE absolute energy-stress curves of argillaceous siltstone under different moisture contents

件,能量很小,声发射平均能率最低。但干燥试件的质地坚硬,裂隙闭合时颗粒摩擦或者滑移时释放的能量较多,自然及饱和试件由于含水导致其裂纹闭合时释放能量较低,3种状态之间平均能率水平均相差一个数量级。

(2)在线弹性阶段,声发射事件增多,对应的声发射能量也出缓慢增加,并未出现急剧性增长。其中,自然试件的增幅最大,达到35.9%,饱和试件只为50%。干燥试件的声发射事件率曲线在此阶段出现剧增,而能率曲线却较为平缓,这说明干燥试件在弹性阶段发生的是数量较多的稳定的弹性破坏,剧烈程度低,释放能量少。

(3)在塑形屈服阶段,岩石内部微裂隙扩展最终汇合贯通,声发射能率曲线出现突增,之后出现短暂的沉寂,直至达到峰值而发生主破坏。其中,干燥试件能率突增效果最为明显,能达到峰值能率

的 48.6%;自然试件的突增点较为模糊,只在能率峰值前 5 s 内出现能率峰值的 10%的突增。

(4)在破坏阶段,岩石因主裂纹的贯穿而发生破坏,能率水平最高,能率峰值滞后于应力峰值,累计声发射能量曲线出现明显的突增。其中,自然试件由于在此阶段经历时间最短,所以平均能率最高,但从整体来看,声发射平均能率水平随含水率的增加而降低。同时,声发射能率峰值也随着含水率的增加而降低,其中,自然试件和自然试件峰值能率达到 10^9 的数量级别,且由于能率峰值较之其他时刻的能率值太大,导致其他时刻声发射能率在图中显现不明显。再者,峰值能率较应力峰值的滞后随含水率的增加而加大,但相差仅为 2 s 和 1 s,不如声发射事件率峰值较应力峰值的滞后现象明显。

同样类比图 4,绘制了 3 种状态下岩石累计声

发射能量的对比图(即图 6),其中横坐标也取了归一化的相对时间。

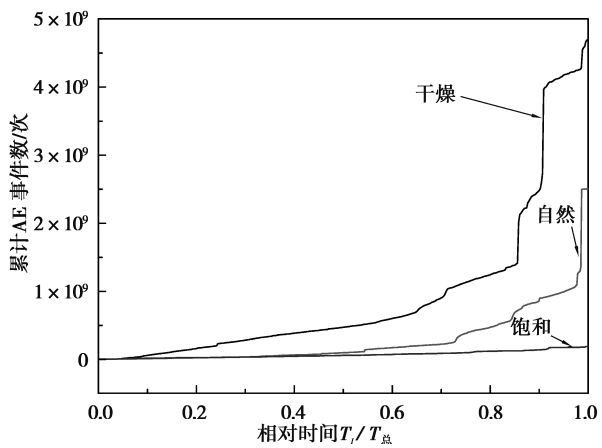


图 6 不同含水泥质粉砂岩累计 AE 绝对能量对比
Fig. 6 AE cumulative absolute energy comparison of argillaceous siltstone under different moisture contents

表 3 不同含水泥质粉砂岩的声发射能量参数对比

Table 3 AE energy parameter comparison of argillaceous siltstone under different moisture contents

试件	AE 平均能率/($\text{aJ} \cdot \text{s}^{-1}$)				AE 能率峰 值 ($\text{aJ} \cdot \text{s}^{-1}$)	累计 AE 能量(aJ)	峰值应力 时间/s	AE 能率峰值 时间/s	时间 差/s
	压密 阶段	弹性 阶段	屈服 阶段	破坏 阶段					
干燥	2 213 794	5 640 661	26 599 470	43 517 411	1 233 945 000	4 689 898 044	370	391	21
自然	460 448	2 163 485	5 005 861	57 243 868	1 142 231 071	2 500 038 027	575	598	23
饱和	180 713	271 143	394 596	752 198	14 115 665	186 263 184	520	554	24

结合图 6 和表 3 可以看出,泥质粉砂岩的累计声发射能量随着含水率的增加而减少,其中,自然试件为干燥试件的 53.3%,饱和试件仅为 4%。分析累计声发射能量曲线变化趋势可以看出:在整个破坏的每一个阶段,干燥岩石的释放能量均为最高,自然试件居中,饱和试件最低;再者,干燥和自然试件的曲线有明显的突增,且伴随有竖直直线增长,显现出脆性破坏,可归为“突发型破裂”,而饱和试件表现出缓慢增长的延性破坏,归为“平稳性破裂”,这与图 4 得出的分类是一致的,且分类依据性更强。

3 结论

(1)水对泥质粉砂岩力学性质起到软化的作用,随着含水率的增加,泥质粉砂岩的峰值应力和弹性模量均减少,且含水使得泥质粉砂岩的变形特征有从脆性逐渐向延性转化的趋势,含水率越大,这种趋势越明显。

(2)含水使得泥质粉砂岩受压破坏的各个阶段破裂程度降低,即破坏全程声发射累计事件数、声发射事件率峰值均随含水率的增大而减小,且声发射事件率峰值较应力峰值的滞后效应和声发射事件数的突增延迟现象均随含水率的增大而趋于明显。

(3)含水使得泥质粉砂岩受压破坏的各个阶段能量释放减少,即破坏全程声发射累计绝对能量、声发射绝对能率峰值均随含水率的增加而减少。

(4)声发射累计事件数和声发射累计绝对能量随时间变化曲线均能反映出含水使得泥质粉砂岩破裂过程中表现形式由“突发型”的脆性破坏向“平稳型”的延性破坏的转变,但声发射累计绝对能量曲线表现更为有力。

参考文献(References)

[1] 谢和平,陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京:科学出版社,

2004. (Xie Heping, Chen zhonghui. Rock mechanics [M]. Beijing: Educational Science Press, 2004. (in Chinese))
- [2] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 699-704.
- [3] Lavar A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2): 151-171.
- [4] 张洋, 李占金, 李示波, 等. 某铁矿采空区地压监控及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2013, 43(3): 128-131. (Zhang Yang, Li Zhanjin, Li Shibo, et al. Analysis on stability and underground pressure monitoring of goaf for a certain iron mine [J]. Metal Mine, 2013, 43(3): 128-131. (in Chinese))
- [5] 吴贤振, 刘祥鑫, 刘洪兴. 砂岩岩爆声发射特征及b值动态特性试验研究[J]. 金属矿山, 2011, 41(3): 16-18. (Wu Xianzhen, Liu Xiangxin, Liu Hongxing. Experiment research on AE characteristics and b-value dynamic characteristics of sandstone rock burst [J]. Metal Mine, 2011, 41(3): 16-18. (in Chinese))
- [6] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503. (Li Shulin, Yin Xiangang, Wang Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503. (in Chinese))
- [7] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137-142. (Yu Xianbin, Xie Qiang, Li Xinyi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, brazilian and uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 137-142. (in Chinese))
- [8] Hawkins A B, McConnell B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1992, 25(2): 115-130.
- [9] 孟召平, 潘结南, 刘亮亮, 等. 含水量对沉积岩力学性质及其冲击倾向性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 2637-2643. (Meng Zhaoping, Pan Jienan, Liu Liangliang, et al. Influence of moisture contents on mechanical properties of sedimentary rock and its bursting potential [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2637-2643. (in Chinese))
- [10] 刘善军, 吴立新, 张艳博, 等. 潮湿岩石受力过程红外辐射的变化特征[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 265-268. (Liu Shanjun, Wu Lixin, Zhang Yanbo, et al. Chang featurer of infrared radiation from loaded damp rock [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(2): 265-268. (in Chinese))
- [11] 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]. 岩石与力学工程学报, 2010, 31(5): 914-920. (Xu Jiang, Wu Hui, Lu Lifeng, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics during shearing process of sandstone under different water contents [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 914-920. (in Chinese))
- [12] 秦虎, 黄滚, 王维忠, 等. 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]. 岩石与力学工程学报, 2012, 31(6): 1115-1120. (Qin Hu, Huang Gun, Wang Weizhong. Experimental study of acoustic emission characteristics of coal samples with different moisture contents in process of compression deformation and failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1115-1120. (in Chinese))
- [13] 李健, 张艳博, 刘祥鑫, 等. 不同含水状态下花岗岩岩爆模拟声发射实验研究[J]. 金属矿山, 2014, 44(4): 53-59. (Li Jian, Zhang Yanbo, Liu Xiangxin, et al. Experimental study of simulated acoustic emission of granites rock brust under diffrent moisture state [J]. Metal Mine, 2014, 44(4): 53-59. (in Chinese))
- [14] 原中华人民共和国电力工业部. 工程岩体力学试验方法标准(GB/T 50266-2013)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (The original Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass (GB/T 50266-2013) [S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [15] 许江, 李树春, 尹光志, 等. 周期荷载作用下岩石非线性变形与损伤特性[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (Xu Jiang, Li Shuchun, Yin Guangzhi, et al. Nonlinear deformation and damage characteristics of rock under cyclic load [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))