

DOI: 10.11779/CJGE20220172

压缩荷载下饱和硬岩软化特性与机制研究

朱俊^{1,2}, 邓建辉^{*2}, 陈菲³, 黄弈茗²

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 成都大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106)

摘要: 环境中的水与岩石的相互作用易导致岩石物理力学性能劣化, 即岩石水软化现象。目前, 饱和硬岩的水软化特性研究尚不完善, 明确各种水岩作用机制的存在条件和作用程度仍是一项挑战性的任务。以不同矿物成分和微结构的典型硬岩(宝兴大理岩、锦屏大理岩、灰岩)为研究对象, 进行干燥、饱和状态下3种硬岩的单轴压缩试验和声发射试验, 分析硬岩压缩强度、弹性模量、破裂形态等力学特性和声发射波形信号主频统计特征, 并探讨了水岩作用机制之孔隙水压力的存在条件和作用程度。结果表明: 硬岩饱和后, 单轴抗压强度和弹性模量均减小, 张拉裂纹和张拉破坏面增多。硬岩破坏的声发射信号表现为明显的、与岩石类型和含水状态无关的双主频特征。硬岩饱和后, 声发射高主频带波形信号明显减少, 低主频带波形信号显著增加。孔隙水压力是3种饱和硬岩性能劣化的主导因素, 其作用强弱与声发射低主频信号多少存在对应关系, 且取决于岩石的矿物成分和孔隙结构。

关键词: 岩石力学; 力学特性; 水岩作用机制; 声发射; 主频

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)04-0768-09

作者简介: 朱俊(1989—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩石力学与岩土工程稳定性方面的研究工作。E-mail: zhujun@imde.ac.cn.

Moisture-induced softening characteristics and mechanisms of saturated hard rocks under compression

ZHU Jun^{1,2}, DENG Jianhui², CHEN Fei³, HUANG Yiming²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: The water-rock interaction in rock mass engineering can lead to physical and mechanical deterioration of rock, that is, the moisture-induced softening phenomenon of rock. Currently, the studies on the moisture-induced softening properties of saturated hard rocks are not comprehensive, and it is still challenging to evaluate the triggering condition and extent of effects related to various water-rock interactions. By choosing the typical hard rocks with different mineral compositions and microstructures (i.e., Baoxin marble, Jinping marble, and limestone), the uniaxial compression tests, along with the acoustic emission (AE) monitoring, of three kinds of hard rocks under dry and saturated conditions are carried out. The mechanical properties of rock including uniaxial compressive strength (UCS), elastic modulus and failure patterns as well as the statistical characteristics of the dominant frequency of AE waveforms are analyzed. Further, the triggering condition and extent of the pore water pressure effects of these three kinds of rocks are evaluated. The results show that when the hard rocks are saturated, the UCS and elastic modulus both decrease, and the tensile cracks and tensile failure surfaces increase. The twin-peak feature of the dominant frequency of all AE waveforms is exhibited, which is independent of the hard rock types and soaking states. As the hard rocks are saturated, the number of AE waveforms in high dominant frequency bands reduces remarkably, while that in low dominant frequency bands increases significantly. The effect of pore water pressure, which corresponds to the low dominant frequency of AE waveforms, is the main factor responsible for the mechanical degradation of three kinds of saturated hard rocks, and its intensity depends on the mineral composition and pore structure of rock.

Key words: rock mechanics; mechanical property; moisture-induced softening mechanism; acoustic emission; dominant frequency

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U19A2098); 国家自然科学基金面上项目(41772322)

收稿日期: 2022-02-18

***通信作者** (E-mail: jhdeng@scu.edu.cn)

0 引言

岩体工程多赋存于水环境中,并常处于饱和状态。环境中的水进入岩体孔隙后易发生水岩相互作用,将改变岩石的矿物组成和微细观结构,引起强度、变形等物理力学性能的劣化。为保证水环境中岩体工程的稳定性,研究饱和岩石的水软化特性和机制十分必要。

目前,许多学者对多种饱和岩石的水软化特性进行了研究。普遍认为,岩石饱和后强度降低,弹性模量减小,泊松比增加,摩擦系数减小。如周翠英等^[1]发现泥岩饱和后,其强度下降了约90%。Mann等^[2]对3种饱和砂岩进行压缩试验,发现弹性模量减小了6%~19%。熊德国等^[3]得到砂岩、砂质泥岩和泥岩的抗压强度水软化系数(饱和岩石抗压强度与干燥岩石抗压强度之比)范围为0.58~0.94。Zhu等^[4]得到大理岩饱和后,单轴抗压强度减小了29.18%,泊松比增加13.90%。黄弈茗^[5]通过剪切试验得到饱和灰岩的摩擦系数降低了25%。Chen等^[6]、Erguler等^[7]和Vasarhelyi^[8]发现凝灰岩饱和后强度降低了2%~88%。工程上常将单轴抗压强度小于20 MPa的岩石称为软岩,20~40 MPa的称为中硬岩,大于40 MPa的称为硬岩。总结来看,目前软岩的水软化特性研究成果丰富,硬岩的水软化特性研究存在不足。

为合理解释饱和岩石力学性能的劣化现象,一些学者提出了诸如黏土矿物软化、矿物颗粒摩擦力下降、孔隙水压力等水软化机制^[9-13]。然而,受限于试验手段和分析方法,饱和岩石力学性能劣化的物理力学机制尚未达成共识,试验成果多,理论分析成果少。Zhu等^[4]综合已有试验成果发现,硬岩的水软化机制可能包括:机制一,黏土矿物软化;机制二,孔隙水压力作用;机制三,摩擦弱化效应;机制四,应力腐蚀。其中,机制一、四分别存在于含黏土矿物和石英矿物的岩石中,且机制一已被公认。机制二、三(统称水岩作用机制,下同)普遍存在于各类饱和岩石中,受到了广泛关注。值得提出的是,上述水软化机制常常同时存在,并相互影响。因此,排除其他针对某一个或几个特定水软化机制,定性和定量描述其存在条件和作用程度成为亟待解决的问题。

声发射(acoustic emission, AE)是材料加载过程中局部应变能释放所产生的瞬态弹性波,因其可以反映材料内部裂隙发育和破坏特性而被广泛应用于岩石力学中^[14-15]。声发射信号的分析方法主要包括参数分析和波形分析。目前一些学者利用声发射特征参数,如声发射事件率、声发射振铃计数、能量等,研究含水岩石的破坏特性^[16-18]。虽然声发射参数分析能反映

饱和岩石破坏的一些释能特征,但将复杂难懂的波形信号抽象成一系列的参数来加以描述,难免会遗失波形所携带的一些重要的信息。近年来,一些学者开始研究声发射波形信号的频谱特征^[14, 19-20]。关于声发射频谱在含水岩石破坏特性研究中的运用,少量学者收获了十分有限的成果。例如,Chugh等^[21]、Read等^[22]分析了干燥和含水岩石的声发射波形信号的主频差异。张艳博等^[23]发现饱和砂岩的声发射信号主频主要分布在35~60 kHz,且主频范围比干燥砂岩集中。然而,基于声发射波形,特别是波形信号的主频统计特征,分析饱和岩石的微观破坏特性进而研究水岩作用机制的成果鲜有报道。

为分析饱和岩石水岩作用机制的存在条件和作用程度,本文选取不含黏土和硅质矿物的典型硬岩,以排除机制一、四的影响,开展硬岩在干燥、饱和状态下的单轴压缩声发射试验,分析压缩强度、弹性模量、破裂形态等力学软化特性,探讨饱和硬岩破坏的声发射波形信号主频统计特征。结合力学软化特性和声发射主频统计特征,研究硬岩水岩作用机制的存在条件和作用程度。研究成果可丰富饱和硬岩力学软化特性的研究内容,并为量化描述水岩作用机制的研究提供新的视角和途径。

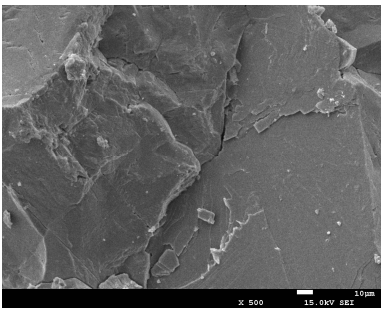
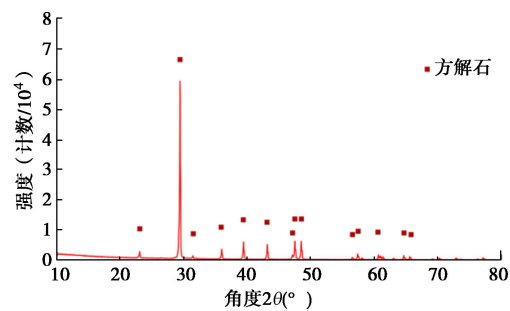
1 试验方法与过程

1.1 试样制备

试验用岩石包括3种:①宝兴大理岩,取样自四川省雅安市宝兴县,②锦屏大理岩,取样自四川省凉山彝族自治州盐源县锦屏一级水电站库岸边坡,③灰岩,取样自四川省凉山彝族自治州雷波县马湖边坡。依据国际岩石力学学会(ISRM)建议方法将岩芯加工成 $\phi 50\text{ mm} \times H100\text{ mm}$ 的标准圆柱体试样。如图1所示,采用X射线单晶衍射仪测定3种岩石的矿物成分和各矿物占比,发现宝兴大理岩和灰岩均由单一矿物方解石组成,锦屏大理岩由方解石(12%)、白云石(87%)、氯化钾(0.5%)、氧化铁(0.5%)组成。说明3种岩石均不含黏土矿物和石英矿物,黏土矿物软化和应力腐蚀作用可以忽略。电镜扫描(SEM)图像显示3种岩石的矿物胶结形态、孔隙数量存在较大差异。利用核磁共振岩芯分析系统(NMR)测定试样的孔隙度。试样的物理特性参数如表1所示。

为获得干燥、饱和试样,将加工好的试样放入105℃的恒温烘箱内烘48 h,使其达到完全干燥状态。冷却至室温后取一半试样置于干燥箱内保存。采用强制饱和法,将剩余试样置于100 kPa的负压真空抽气机中强制饱和48 h,并静置4 h。随机选取3种岩石

的干燥、饱和试样各 2 个，采用干馏法测定水饱和度，发现其值分别接近 0 和 1，认为获得的干燥、饱和试样满足试验要求。



(c) 灰岩

图 1 各种硬岩 XRD 测试结果和 SEM 图

Fig. 1 XRD and SEM results of different rocks

表 1 试样基本物理性质参数

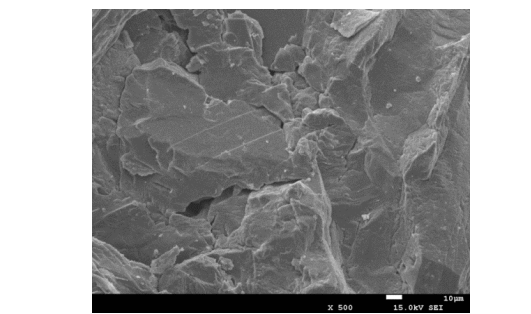
Table 1 Basic physical parameters of samples

岩石类型	天然密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙度/ %	纵波波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	矿物成分
宝兴大理岩	2.69 (± 0.04)	6.16 (± 0.25)	4262 (± 30.73)	方解石
锦屏大理岩	2.98 (± 0.17)	2.68 (± 0.13)	4689 (± 29.32)	方解石、白云石、 氯化钾、氧化铁
灰岩	2.63 (± 0.11)	4.80 (± 0.09)	3826 (± 18.67)	方解石

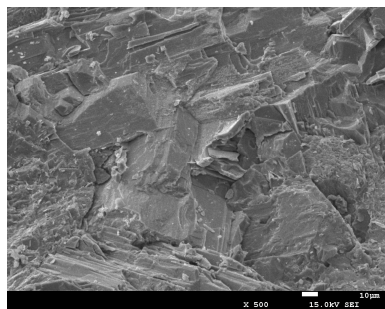
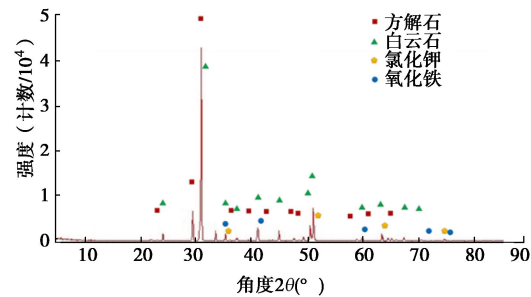
注：括号内数值为试样样本参数的标准差。

1.2 试验设备与方案

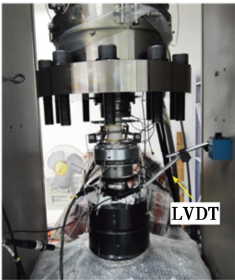
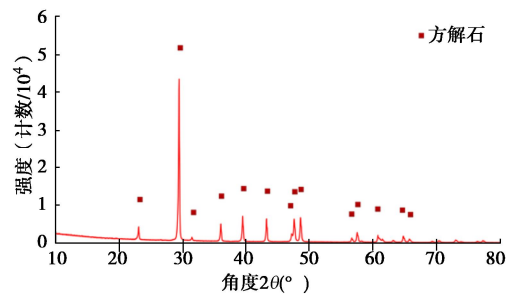
试验采用 MTS815 Flex Test GT 岩石力学试验系统和 PCI-2 声发射采集系统进行。每个试样布置 8 个 Micro30 高精度传感器，可以有效采集试验过程的声发射信号^[4, 13]。声发射前置放大器阈值（增益）为 40 dB，采样阈值为 30 dB。试样与传感器间涂抹耦合剂，以保证信号数据的有效采集。试验设备与传感器布置如图 2 所示。试验采用 LVDT 进行轴向位移控制，加载速率为 0.05 mm/min。每种岩石包括干燥、饱和试验组各 1 组，每组 4 个试样，共计 24 个。试验过程中，保证力学加载系统与声发射采集系统的时间同步。



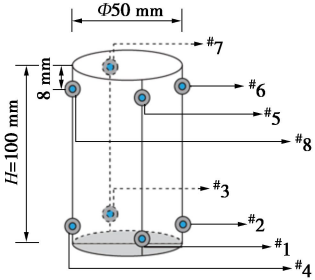
(a) 宝兴大理岩



(b) 锦屏大理岩



(a) 加载装置



(b) 传感器分布

图 2 试验装置和声发射传感器布置图

Fig. 2 Setup and layout of AE sensors

2 试验结果

2.1 力学软化特性

3种岩石典型试样的应力应变曲线如图3所示。可以看出, 试样在单轴压缩荷载作用下的应力应变曲线具有明显的阶段性, 即加载初期的非线性段(压密段)、线弹性段、峰值应力前的塑性变形段和峰后段。饱和试样的峰值应变(峰值应力对应的应变)比干燥试样的大, 表现出应变软化特性。相比较而言, 锦屏大理岩力学性能最强, 灰岩次之, 宝兴大理岩最弱。

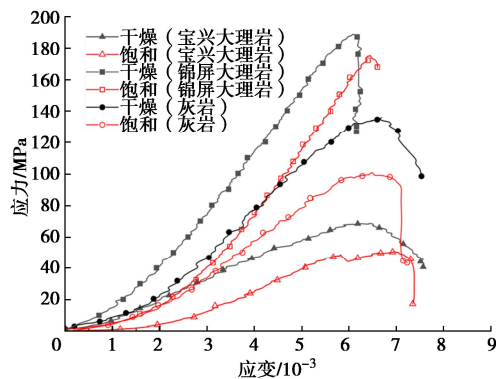


图3 典型试样应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of typical rock samples

干燥、饱和状态下3种岩石的单轴抗压强度 σ 、弹性模量 E 及软化系数 f 如图4、5所示。其中, 软化系数 f 为饱和试样组的力学参数均值与干燥试样组的力学参数均值的比值, f_σ 和 f_E 分别表示单轴抗压强度软化系数和弹性模量软化系数。

可以看出, 3种岩石饱和后, 力学性能均出现明显劣化, 表现为单轴抗压强度和弹性模量减小。宝兴大理岩、锦屏大理岩、灰岩的单轴抗压强度软化系数分别为0.74, 0.94, 0.76, 弹性模量软化系数分别为0.72, 0.92, 0.79。相比较而言, 宝兴大理岩水软化性能最强, 灰岩次之, 锦屏大理岩最弱。

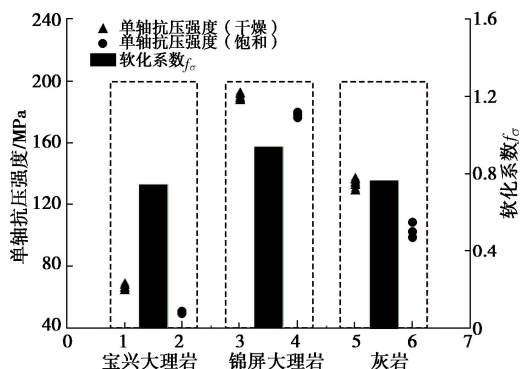


图4 干燥、饱和状态岩石单轴抗压强度和软化系数

Fig. 4 Uniaxial compressive strengths and softening coefficients of rocks under dry and saturated conditions

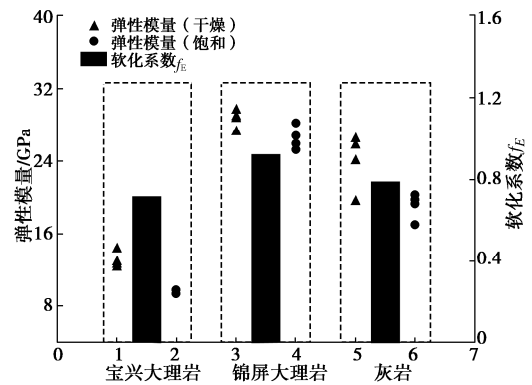
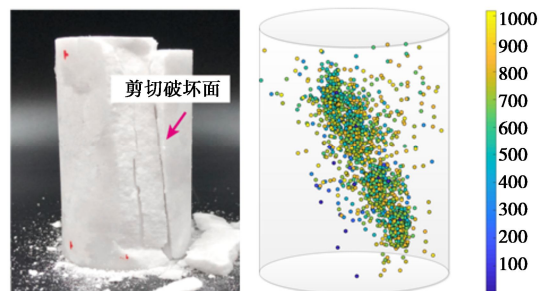


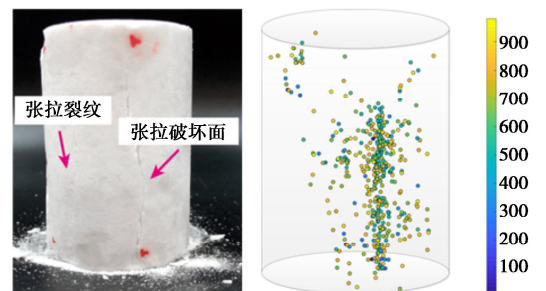
图5 干燥、饱和状态岩石弹性模量和软化系数

Fig. 5 Elastic moduli and softening coefficients of rocks under dry and saturated conditions

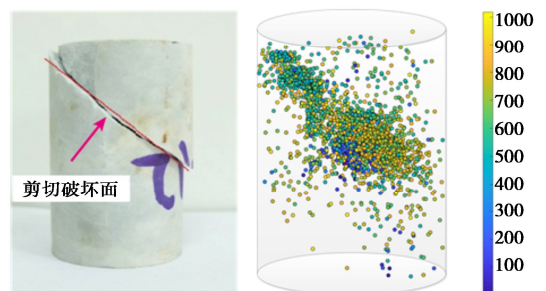
干燥、饱和状态下典型试样的宏观破坏形态与声发射事件定位见图6, 图中声发射事件的颜色对应不同的加载时间。可以看出, 声发射事件多发生于试样的宏观破坏面或裂纹处, 宏观破坏形态与声发射事件定位能较好吻合。相比较而言, 锦屏大理岩破坏时释放的声发射信号比宝兴大理岩和灰岩的多。在压缩荷载作用下, 干燥岩石多发生剪切破坏, 试样可见明显的单斜面或共轭斜面剪切破坏面。岩石饱和后, 平行于试样轴向的张拉裂纹和张拉破坏面增多。



(a) 干燥宝兴大理岩



(b) 饱和宝兴大理岩



(c) 干燥锦屏大理岩

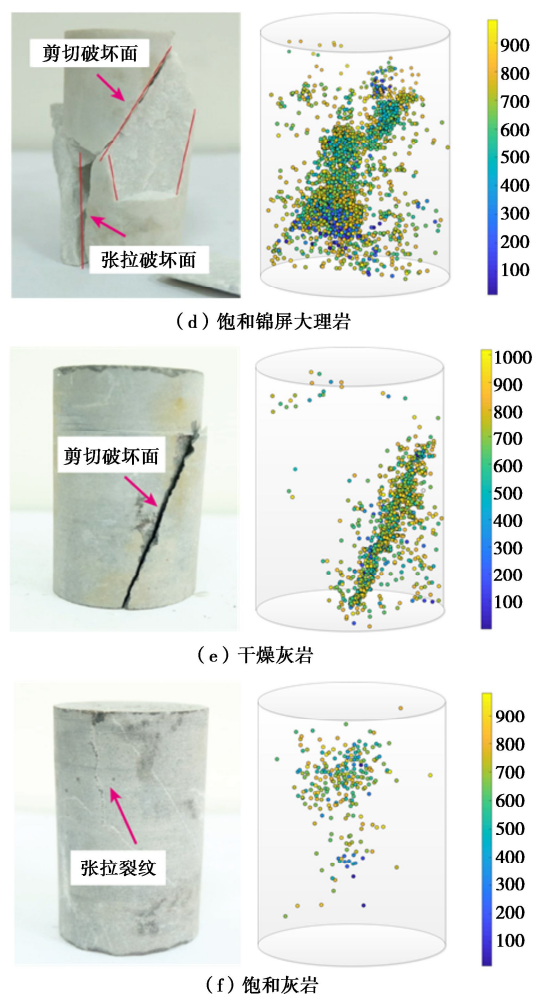


图6 岩石宏观破裂形态和声发射事件定位

Fig. 6 Failure patterns of rocks and location of acoustic emission events

2.2 声发射波形主频特性

(1) 数据处理

试验采集了加载全过程岩石释放的声发射波形信号。本文采用声发射信号频谱统计分析方法,即将所有通道采集的海量信号数据进行统计分析。首先,通过 MATLAB 编程,采用快速傅立叶变换(FFT)获得声发射波形信号的主频参数(图7)。其次,对获得的波形信号主频进行区段划分。室内岩石的声发射频率位于 $10 \sim 500$ kHz 范围内^[24],且一般低于 450 kHz。为便于统计分析,参照李林芮^[25]、邓建辉等^[26]的研究,采用的主频区段划分方法为:主频 $0 \sim 450$ kHz,按每 10 kHz 划分一个主频段,共 45 个主频段;主频 451 ~ 500 kHz,划分为一个主频段,合计 46 个主频段。

(2) 声发射主频特征

干燥、饱和状态下 3 种岩石典型试样的主频占比统计见图 8。可以发现,在压缩荷载作用下,干燥、饱和岩石的声发射波形主频均集中在 2 个主频带范围内,称之为高主频带和低主频带。作为邓建辉等^[26]关于岩石声发射双主频特性的后续研究,说明双主频

现象是岩石破坏的一种固有特性,与岩石类型和含水状态无关。岩石饱和后,高、低主频带范围发生变化。以宝兴大理岩为例,干燥宝兴大理岩的高、低主频带分别集中在 $230 \sim 320$ kHz(第 24~32 主频段)和 $11 \sim 80$ kHz(第 2~8 主频段),饱和宝兴大理岩高、低主频带分别集中在 $230 \sim 270$ kHz(第 24~27 主频段)和 $0 \sim 50$ kHz(第 1~5 主频段)。

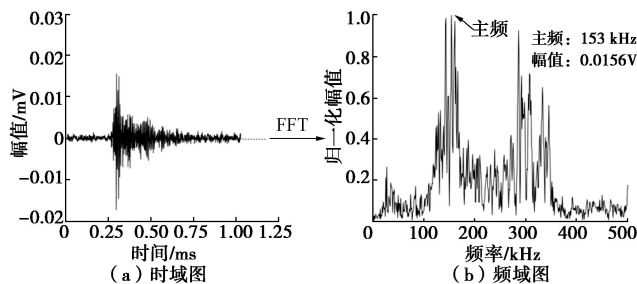


图7 典型声发射信号的时域图和频谱图

Fig. 7 Typical acoustic emission waveforms and their spectra

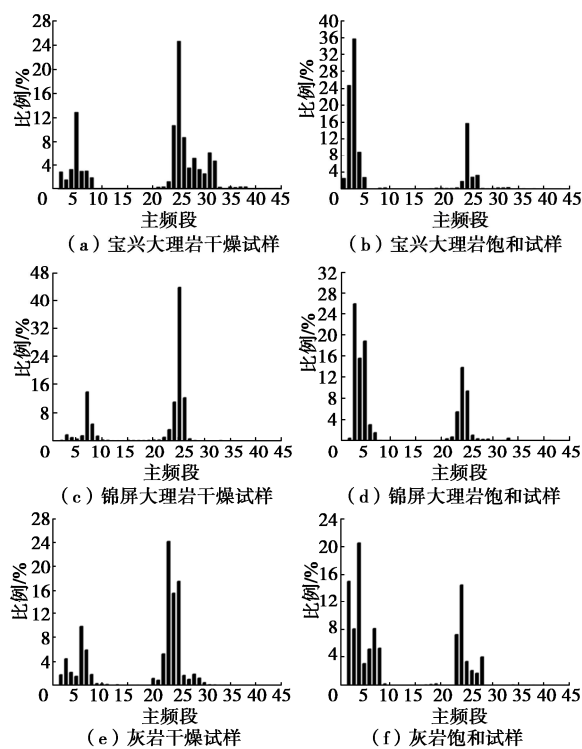


图8 干燥、饱和状态下岩石的主频占比统计

Fig. 8 Proportions of dominant frequency of rock samples under dry and saturated conditions

将占比超过 1% 的主频段计入样本范围,统计得到干燥、饱和岩石的声发射高、低主频数量占比和能量占比,如图 9 所示。干燥、饱和试验组试样主频数量占比均值和能量占比均值如表 2 所示。其中能量以声发射信号幅值的平方表征。干燥岩石破坏的声发射以携带高能量的高主频带信号为主,最小高主频信号数量占比均值为 69.51%,最小高主频信号能量占比均值为 70.70%。3 种硬岩饱和后,高主频带波形信号明

显减少, 低主频带波形信号显著增多。低主频带信号占据主导地位, 且携带能量更多。最小低主频信号数量占比均值为 58.77%, 最小低主频信号能量占比均值为 65.01%。

表 2 干燥、饱和岩石的声发射主频参数均值统计

Table 2 Average values of dominant frequency parameters of different rocks under dry and saturated conditions

岩石类型	状态	$N/10^4$	低频带		高频带	
			$P_N/\%$	$P_E/\%$	$P_N/\%$	$P_E/\%$
宝兴大理岩	干燥	6.89	25.55	29.14	70.29	70.70
理岩	饱和	5.56	73.13	73.16	23.59	26.84
锦屏大理岩	干燥	2.42	28.63	25.15	70.84	74.35
理岩	饱和	1.31	58.77	65.01	35.18	29.11
灰岩	干燥	5.79	27.93	21.39	69.51	78.24
	饱和	3.48	68.65	78.52	29.73	20.60

注: 表中 N , P_N , P_E 分别表示波形数、不同主频带信号数量占比、不同主频带信号能量占比。

3 水软化机制分析

硬岩的矿物成分决定水软化机制的存在条件。宝兴大理岩、锦屏大理岩和灰岩不含黏土矿物和硅质矿物, 可能存在的水软化机制包括孔隙水压力(机制二)和摩擦弱化效应(机制三)。如表 2 和图 9 所示, 上述 3 类硬岩饱和后, 低主频信号数量及携带能量显著增加, 并占绝对优势。李林芮^[25]、邓建辉等^[26]提出并验证, 岩石的高主频波形信号对应微观剪切破坏, 低主频波形信号对应微观拉伸破坏。换言之, 本文研究的硬岩饱和后, 发生的微观拉伸破坏明显增多, 并占据主导地位。而 3 类岩石只可能存在孔隙水压力和摩擦弱化效应水软化机制, 一种比较直观的推论是两种水软化机制中的一种或全部导致微观拉伸破坏数量的增加。

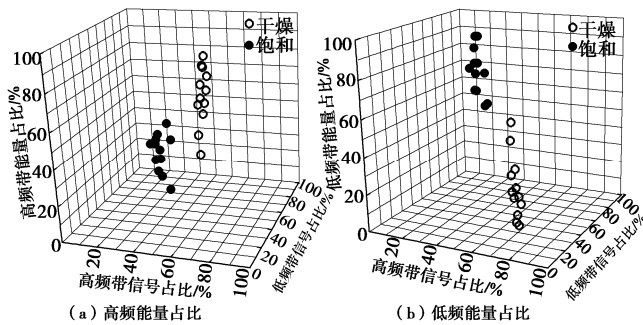
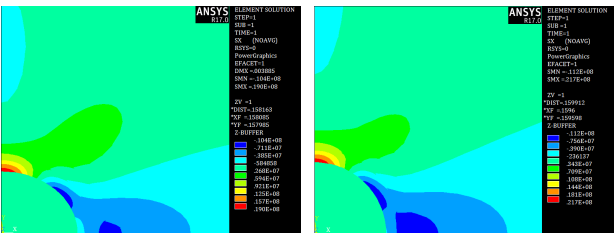


图 9 岩石高、低主频信号数量占比及能量占比

Fig. 9 Percentages of high and low dominant frequency bands and corresponding energy of different rocks

为论证上述推论, 采用 ANSYS 数值软件对有(无)孔隙压力的单一孔隙周边的应力分布进行模拟分析。将试样孔隙简化为半径为 1 mm 的圆形孔洞, 轴向压力为 20 MPa。通过迭代计算获得孔洞周边的应

力分布, 如图 10 所示。对比分析可以得出, 有孔隙压力时, 孔隙周边的拉应力普遍更大, 最大拉应力由 19 MPa(无孔隙压力时)增加至 21.7 MPa, 即孔隙压力导致拉应力增加。因此可以推断, 饱和岩石的孔隙水压力作用机制将导致孔隙周边拉应力增加, 产生更多微观拉伸破坏。这一推断也从图 6 中饱和硬岩的破坏形态得到证实, 即饱和硬岩出现更多张拉裂纹和张拉破裂面。而微观拉伸破坏对应声发射低主频波形信号, 所以声发射低主频信号数量增加。总结来说, 饱和岩石孔隙水压力作用的强弱与声发射低主频信号的多少存在对应关系。



(a) 无孔隙压力 (b) 有孔隙压力

图 10 单一孔隙周边应力的数值模拟

Fig. 10 Numerical simulation of stress distribution around a single pore

3 类硬岩饱和后低主频信号占比的增量与单轴抗压强度软化系数的关系如图 11 所示。可以得到, 低主频信号占比增量与强度软化系数间存在负相关关系, 即低主频信号占比增量越大, 强度降低越明显。这佐证了孔隙水压力是上述 3 种硬岩强度降低的主导因素。

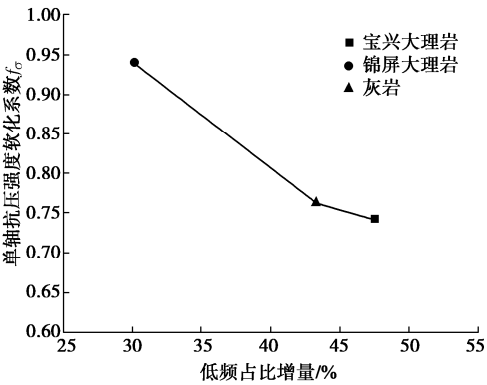


图 11 低频占比增量与单轴抗压强度软化系数关系

Fig. 11 Relationship between increment of percentage of low dominant frequency and softening coefficient of uniaxial compressive strength

相比较而言, 宝兴大理岩和灰岩的低主频信号增量相差不多, 强度软化系数也接近, 而锦屏大理岩则表现出巨大差异。笔者认为这与岩石的矿物成分和孔隙结构密切相关。宝兴大理岩和灰岩的矿物成分均为

方解石, 孔隙度分别为 6.16% 和 4.80%, 两者矿物成分和孔隙结构相似, 因而软化系数接近, 分别为 0.74 和 0.76。锦屏大理岩由多种矿物组成, 孔隙度为 2.68%。由图 1 的 SEM 图像可以看出, 矿物颗粒胶结紧密, 未见明显孔隙。可以证实, 锦屏大理岩结构致密, 未提供孔隙水压力作用的良好条件, 发生的微观拉伸破坏比宝兴大理岩和灰岩少, 因而声发射低主频信号占比增量更小。综上分析, 不含黏土、硅质矿物岩石的矿物成分和孔隙结构决定孔隙水压力作用的强弱。

4 工程应用探讨

大多数岩体工程, 如水电站库岸边坡、部分地下工程等, 常处于水环境中, 易引起岩体物理力学性能劣化, 威胁工程的长期稳定和安全。在岩体工程各类分级评估中, 包括工程岩体分级、岩体参数评估等, 饱和单轴抗压强度作为强制性指标被广泛应用^[27]。由于岩石饱和后, 强度降低, 采用饱和单轴抗压强度进行评估提高了工程的安全系数。但“全盘”要求使用饱和单轴抗压强度使工程稳定性评估有时过于保守, 不利于建设的高效和经济。

不同类型饱和岩石的矿物成分、微结构、孔隙度和连通性等差异巨大, 这决定了各种水软化机制的存在条件和作用程度。确定岩石矿物成分是水软化机制分析的首要工作。如前言所述, 不含黏土矿物和硅质矿物的岩石可能存在孔隙水压力作用和摩擦弱化效应。本文分析得出, 饱和碳酸盐类岩石的水软化机制以孔隙水压力为主导, 产生更多的微观拉伸破坏, 且孔隙水压力作用强弱受到孔隙度的影响。由于岩石抗压剪不抗拉伸^[28], 岩体工程分级评估时, 应以提高安全系数为原则, 即由大孔隙度、碳酸盐类矿物组成的岩体工程处于水环境中时, 应严格按饱和单轴抗压强度进行设计评估, 以保证工程安全。

声发射低主频信号增量与强度软化系数的负相关关系可应用于水环境中岩体工程的设计评估。在压缩荷载作用下, 饱和岩石的声发射低主频信号增量与孔隙水压力作用强弱相对应, 进而可预测发生微观拉伸破坏的多少。普遍认为, 微观拉伸破坏与岩石强度间存在相关性。如图 12 所示, 笔者进行不同加载速率下宝兴大理岩干燥试样的单轴压缩试验, 获得低主频信号(拉伸破坏)占比与单轴抗压强度的拟合曲线。发现两者间存在负相关性, 即低主频信号越多, 岩石强度越低。这与岩石抗压剪不抗拉伸的事实相符, 由于岩石内部发生的微观拉伸破坏(低主频信号)多, 岩石强度低。说明对应拉伸破坏的低主频信号可用于表

征岩石强度变化。本文试验用 3 种岩石的强度软化系数随声发射低主频信号增量的增加而减小, 说明声发射低主频信号可以表征碳酸盐类饱和岩石强度的劣化程度。声发射低主频信号可作为一种新的特征参数应用于含水岩体工程的设计和安全评估。

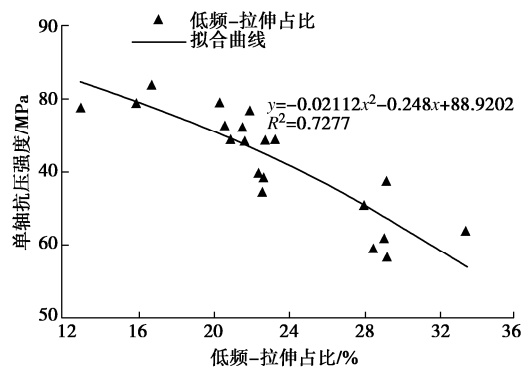


图 12 宝兴大理岩强度与低主频信号占比间关系

Fig. 12 Relationship between uniaxial compressive strength of marble and percentage of low dominant frequency

5 结 论

对 3 类硬岩(宝兴大理岩、锦屏大理岩、灰岩)饱和后的力学软化特性和声发射主频统计特征进行了分析, 探究了水岩作用机制之孔隙水压力的存在条件和作用程度, 取得以下 3 点结论。

(1) 硬岩饱和后力学软化特性明显, 单轴抗压强度和弹性模量减小, 出现更多张拉裂纹和张拉破坏面。

(2) 硬岩破坏释放的声发射信号存在双主频现象, 且与岩石类型和含水状态无关。硬岩饱和后, 声发射高主频带信号明显减少, 低主频带信号显著增加。

(3) 水岩作用机制之孔隙水压力是不含黏土、硅质矿物硬岩性能劣化的主导因素, 其作用强弱与声发射低主频信号多少存在对应关系, 且取决于矿物成分和孔隙结构。

参考文献:

- [1] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394-400. (ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394-400. (in Chinese))
- [2] MANN R L, FATT I. Effect of pore fluids on the elastic properties of sandstone[J]. Geophysics, 1960, 25(2): 433-444.
- [3] 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. (XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(5): 998-1006. (in Chinese))
- [4] ZHU J, DENG J H, CHEN F, et al. Water saturation effects on mechanical and fracture behavior of marble[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(10):
- [5] 黄弈茗. 灰岩与大理岩的水软化机理研究[D]. 成都: 四川大学, 2019. (HUANG Yiming. Moisture-Induced Softening Mechanism of Limestone and Marble[D]. Chengdu: Sichuan University, 2019. (in Chinese))
- [6] CHEN T C, YEUNG M R, MORI N. Effect of water saturation on deterioration of welded tuff due to freeze-thaw action[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, **38**(2/3): 127-136.
- [7] ERGULER 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] VA'SA'RHELYI B. Influence of water saturation on the strength of Volcanic Tuffs in Eurock[C]// International Symposium-Eurock. Maderia, 2002: 89-96.
- [9] HAWKINS A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, **25**(2): 115-130.
- [10] SAKUMA H. Adhesion energy between mica surfaces: implications for the frictional coefficient under dry and wet conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, **118**(12): 6066-6075.
- [11] PARK N, OLSON J E E, HOLDER J. Stress-corrosion cracking as an alternative time-dependent shale-stability model[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, **25**(2): 168-176.
- [12] ZHOU Z L, CAI X, ZHAO Y, et al. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, **26**(7): 1919-1925.
- [13] 朱俊, 邓建辉, 黄弈茗, 等. 饱和大理岩特征强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(6): 1129-1138. (ZHU Jun, DENG Jianhui, HUANG Yiming, et al. Experimental study on the characteristic strength of saturated marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(6): 1129-1138. (in Chinese))
- [14] OHNAKA M, MOGI K. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure[J]. Journal of Geophysical Research, 1982, **87**(B5): 3873.
- [15] CAI M, MORIOKA H, KAISER P K, et al. Back-analysis of rock mass strength parameters using AE monitoring data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(4): 538-549.
- [16] SUN X M, XU H C, ZHENG L G, et al. An experimental investigation on acoustic emission characteristics of sandstone rockburst with different moisture contents[J]. Science China Technological Sciences, 2016, **59**(10): 1549-1558.
- [17] 邓朝福, 刘建峰, 陈亮, 等. 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(8): 1538-1544. (DENG Chaofu, LIU Jianfeng, CHEN Liang, et al. Mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of fracture of granite under different moisture conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(8): 1538-1544. (in Chinese))
- [18] 李博, 叶鹏进, 黄林, 等. 干燥与饱和岩石裂隙受压变形与声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(12): 2249-2257. (LI Bo, YE Pengjin, HUANG Lin, et al. Deformation and acoustic emission characteristics of dry and saturated rock fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(12): 2249-2257. (in Chinese))
- [19] 何满潮, 赵菲, 张昱, 等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(1): 1-8, 33. (HE Manchao, ZHAO Fei, ZHANG Yu, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(1): 1-8, 33. (in Chinese))
- [20] 赵奎, 杨道学, 曾鹏, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声学信号频域特征分析[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(12): 2189-2197. (ZHAO Kui, YANG Daoxue, ZENG Peng, et al. Frequency-domain characteristics of acoustic signals of granite under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(12): 2189-2197. (in Chinese))
- [21] CHUGH Y, STEFANKO R. Investigation of the frequency

- spectrum of microseismic activity in rock under tension[C]// Applied Rock Mechanics, Proceedings tenth Symposium of rock mechanics held at the University of Texas at Austin, Austin, 1968.
- [22] READ M D, AYLING M R, MEREDITH P G, et al. Microcracking during triaxial deformation of porous rocks monitored by changes in rock physical properties: II Pore volumetry and acoustic emission measurements on water-saturated rocks[J]. Tectonophysics, 1995, **245**(3/4): 223-235.
- [23] 张艳博, 黄晓红, 李莎莎, 等. 含水砂岩在破坏过程中的频谱特性分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1574-1578. (ZHANG Yanbo, HUANG Xiaohong, LI Shasha, et al. Spectral character analysis of sandstone under saturation condition in rupture procedure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1574-1578. (in Chinese))
- [24] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(4): 550-564.
- [25] 李林芮. 岩石破坏的声发射主频特征与力学机制[D]. 成都: 四川大学, 2017. (LI Linrui. Acoustic Emission Frequency Characteristics and Mechanical Mechanism of Rock Failure[D]. Chengdu: Sichuan University, 2017. (in Chinese))
- [26] 邓建辉, 李林芮, 陈菲, 等. 大理岩破坏的声发射双主频特征及其机制初探[J]. 工程科学与技术, 2018, **50**(5): 12-17. (DENG Jianhui, LI Linrui, CHEN Fei, et al. Twin-peak frequencies of acoustic emission due to the fracture of marble and their possible mechanism[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, **50**(5): 12-17. (in Chinese))
- [27] 工程岩体试验方法标准: GB/T50266—201[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. (Standard for Test Method of Engineering Rock Mass: GB/T50266—201[S]. Beijing: China Planning Press, 2013. (in Chinese))
- [28] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(17): 3003-3010. (XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(17): 3003-3010. (in Chinese))

勘 误

《岩土工程学报》2021年(第43卷)增刊2“不排水抗剪强度的旋转各向异性非平稳随机场模拟”一文(第一作者田宁, DOI: 10.11779/CJGE2021S2022)中, 作者单位标注有误, 特此更正如下:

(1)中文单位1“中国科学院武汉岩土力学研究所岩石力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071”更正为“中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071”。

(2)英文单位1“State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Wuhan 430071, China”更正为“State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China”。

由于作者和编者的不慎带来的上述错误, 给读者的阅读造成不便, 在此深表歉意!

(本刊编辑部)