

水浸影响下大理岩加载的声发射特征研究

魏凡博

黑龙江工业学院 环艺与建筑工程学院 黑龙江鸡西 158100

摘要: 本文通过对大理岩进行单轴压缩试验及其水浸前后声发射撞击数的对比分析, 深入讨论了大理岩在加载过程中声发射撞击数和事件间隔函数的演化规律及其差异。结果表明: (1) 不同加载阶段岩石声发射撞击数和事件间隔函数的演化特征差异明显, 并可依此对岩石所处的加载阶段进行划分; (2) 对于压密阶段和弹性阶段, 经水浸过程的岩样的声发射撞击数明显小于未水浸岩样; (3) 水浸过程对缓解大理岩的脆性特性具有明显的作用。这对实际工程中降低岩爆发生概率, 减弱岩爆强度等级等方面提供了理论支撑。研究成果对深入探究水岩作用机理具有理论价值, 对实际工程具有较强的指导意义。

关键词: 大理岩; 水浸影响; 单轴压缩; 声发射撞击

引言

声发射是一种岩石力学中重要的监测手段之一。由于声发射监测具有连续性强, 灵敏度高、实时性好的特点, 在岩土工程检测等相关领域得到了广泛的应用。岩石在加载过程中, 岩石内局部发生变形, 裂纹开始萌生和扩展, 引起岩石内部的应力场快速调整, 在此过程中岩石内部蓄积的弹性应变能得以释放, 产生瞬态弹性波的现象称为岩石的声发射现象^[1]。目前, 岩石声发射的相关研究主要集中于分析声发射的时空分布、b值、震源机制、频谱特征等方面^[2-3]。20世纪50年代, Kaiser观察到铜、铝、锌、铅、铸铁和钢等金属和合金在形变过程中都有声发射现象产生, 并发现了声发射技术领域重要的Kaiser效应, 以及声发射对不可恢复的损伤具有良好的记忆效应^[4]; 随后的研究中人们还发现声发射现象具有Facility效应。随后, 声发射被广泛应用于无损检测领域。20世纪70-80年代, 学者们从声发射震源机制, 弹性波传播轨迹以及声发射特征参数等方面进行了进一步深入的研究。我国学者陈颢率先对岩石的声发射特征进行了相关研究^[5]。目前, 声发射是少数实践领先于理论发展的学科之一, 这主要是由于人们对于岩石破裂机制的研究仍有不足^[6], 并且在无损检测与评价方面仍然需要系统而深入的研究。特别是对于频谱分析, 由于其在理论上携带破裂的全部信息, 因而越来越多地受到相关研究者的重视。

张艳博等^[7]通过大理岩双轴模拟实验发现, 采用声发射技术预测岩石的破裂具有可行性。陈炳瑞等^[2]基于声发射技术对西南地区花岗岩的破坏机制进行了深入的

研究, 发现声发射特征与岩石的破裂模式有密切关系。实验及现场工程实践发现, 水对岩石声发射特性具有明显的影响效应^[8]。方亚如等^[9]提出, 水对声发射的事件率和幅值影响明显。岩石含水后声发射事件数明显降低, 这与水对岩石物理力学性质的影响机制相关, 但事件数的降低并不影响声发射事件数在岩石的加载过程中的时程演化规律。包一峰等^[10]基于砂岩的实验对于这一结论进行了进一步验证。此外, 实验发现, 干燥岩石的声发射b值随着应力的增加而降低, 水浸后岩石的声发射b值随着应力的增加而升高。唐书恒等^[11]对饱水煤岩的应力应变曲线进行了深入分析, 并按破坏模式差异将压裂过程进行了归类。许江等^[12]分别对含水率为0, 50%, 100%的砂岩进行了剪切实验, 发现随着饱和度的增加岩石声发射特征具有明显的差异。李健等^[13]对比了饱水与自然状态下岩石声发射特征参数的差异, 并总结了岩石破坏的前兆特征。王亚东等^[14]基于室内岩爆模拟实验, 发现饱水后岩样声发射活跃程度明显降低。王创业等^[15]通过实验发现不同含水状态下声发射主频特性存在明显的差异。秦虎等^[16]对不同含水率的煤岩进行常规单轴的声发射实验, 并对加载全过程的声发射特征进行分阶段的细致分析, 发现水浸后全过程的声发射特征均与干燥煤岩相比具有明显的差异。童敏明等^[17]对含水煤岩加载过程中的声发射频谱特性进行了深入分析, 结果表明含水量对于声发射信号强度、频率特性均有显著的影响。总的来看, 目前的研究表明水对岩石的声发射特性具有影响, 但是相关研究多侧重于砂岩、页岩、煤岩等, 对于大理岩为代表的硬岩的相关研究还较为少见。此外, 由于岩

石破裂机理的复杂性、岩石中含水状况的差异性和声发射检测中参数设置的差异性等原因,导致不同学者总结出的实验结果存在一定差异。因此,水浸过程对于岩石声发射特性的影响效应仍然需要进一步研究。

一、基于事件间隔函数 (IET) 对不同水浸时间岩石加载阶段的划分

基于目前的研究,事件间隔函数 (IET) $F(\tau)$ 对于岩石的破坏过程的可以实现即时而精细的分析^[18]。该方法的分析原理是:基于实验中声发射探头所采集到的声发射撞击信息,即时而快速地获取岩石全破坏过程中的“声发射撞击率特征”。将计算方法详细介绍如下:

①确定撞击时间间隔 N ,确定含 N 个撞击事件的滑动时间窗 (t_{i-1}, t_{i+N-1}) ;

②求滑动时间窗内所含有的 N 个撞击事件的时间间隔移动平均值:

$$\tau_i = \frac{t_{N+i-1} - t_{i-1}}{N} \quad (i=2, 3, \dots) \quad (1)$$

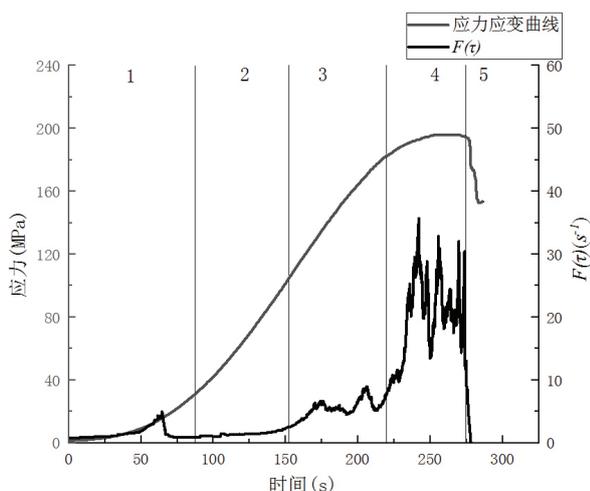
特别地,令

$$\tau_1 = \frac{t_N - t_1}{N} \quad (2)$$

③时间窗确定后,计算声发射事件的时间间隔函数:

$$F(\tau) = \tau_i^{-1}, \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

其中: t 表示撞击所发生的时刻, N 为滑动时间窗内含有的撞击事件的个数, i 表示撞击事件发生的序号。



(1—压密阶段,2—弹性阶段,3—裂隙稳定开展阶段,4—裂隙非稳定开展阶段,5—峰后破坏阶段)

图1 未经水浸过程的应力—应变— $F(\tau)$ 演化曲线

如图1,我们基于岩石单轴加载的应力应变曲线和时间间隔函数 $F(\tau)$ 可以实现对岩石加载阶段的划分。首先基于应力应变曲线的下凸段,可确定岩石处于压密

阶段,随后岩石进入弹性阶段。由于岩石的弹性变形并不会引起材料自身发生破坏,因此该阶段探头几乎收集不到声发射信息。故该阶段的 $F(\tau)$ 为一条水平的直线;随后 $F(\tau)$ 开始逐渐上升,说明岩样内部的声发射现象逐渐活跃,即岩样内的微破裂活动逐渐增多。但此时的声发射现象增速不明显,即微破裂的发生是零星散发的,岩石加载应处于裂隙的稳定开展阶段。此时岩石还具有较为稳定的承载能力。随后,在图中我们看到, $F(\tau)$ 演化曲线开始陡然上升,这说明岩石内部的声发射现象十分活跃,微破裂活动开始聚集成核,进入不稳定的增长阶段,此时岩石的宏观力学特性大大降低,岩石的抗压强度达到峰值;随后岩石的应力应变曲线陡然跌落,岩石加载进入峰后破裂阶段。

二、不同水浸时间下岩石在不同加载阶段的声发射特征演化规律

声发射撞击 (Hit) 是指超过预设阈值的,并使得某一声发射通道获得数据的任一声发射信号,是声发射技术中最常用的特征参数之一,用以描述材料内部产生弹性波信号的总量以及发生的频度,是声发射活动性的重要评价指标,具有广泛的应用领域。

以大理岩为例,下文分别对水浸时间为0天、4天、7天和30天的大理岩的累计声发射撞击数的演化规律与特征进行分析,探究不同加载阶段下水对声发射撞击数的影响。将阈值设定为50dB,以去除杂音的干扰;并设置带通滤波器,将其频率的接受范围定为20~400kHz。

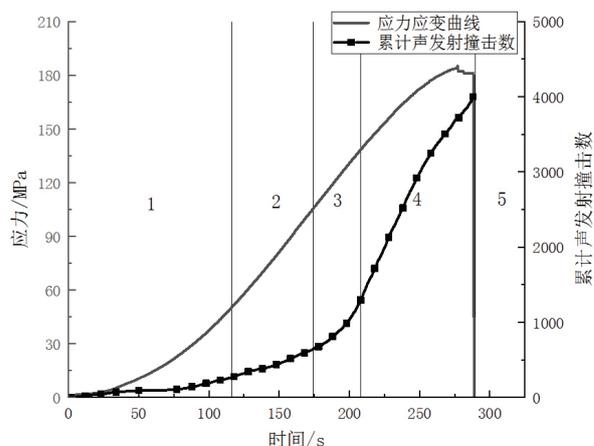


图2 未水浸的大理岩累计声发射撞击数演化过程与应力应变曲线

从图2看,未水浸的大理岩累计声发射撞击数演化过程具有明显的阶段性。首先,基于应力应变曲线可以明显地划分出岩石加载过程的压密阶段,随后曲线进入

直线段，并且伴随极少量的声发射信号产生，标志着岩石加载进入弹性阶段；在弹性阶段之前，累计声发射撞击率增长得十分迟缓。出现这种现象的原因是：在压密阶段，岩石内部原有的裂纹在压力作用下逐渐闭合，岩石颗粒之间的挤压与摩擦导致此时出现少量的声发射现象；在弹性阶段，由于岩石的变形可以完全恢复，故而理论上讲此时的加载还未对岩石材料造成损伤；在岩石加载至弹性阶段之后，岩石声发射撞击率开始出现了一定程度的升高，即图示的第三阶段。此时岩石内部开始出现散发的微小破裂，破裂产生的弹性波被声发射探头捕获，累计撞击数斜率较前两个阶段有所增加。随着加载的进一步进行，微破裂开始逐渐发展、成核、聚合成宏观裂纹，伴随着岩石内部十分活跃的宏细观破裂活动，导致累计声发射撞击曲线斜率达到最大，直到岩石达到峰值强度，这一阶段即图中所示的第四阶段，即裂隙的非稳定开展阶段。

通过试验我们发现，在岩石的不同加载阶段，声发

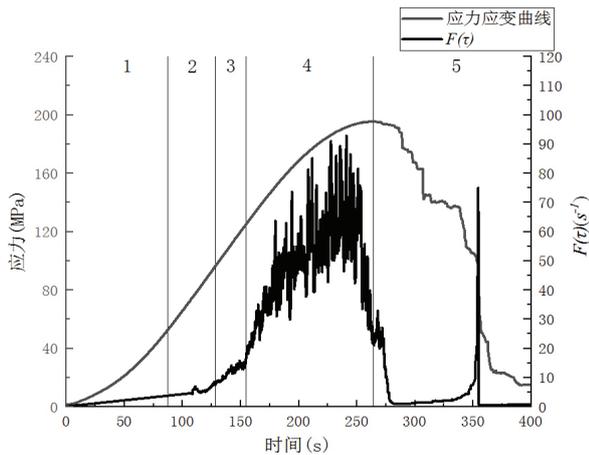


图3 水浸4天的应力—应变— $F(\tau)$ 演化曲线

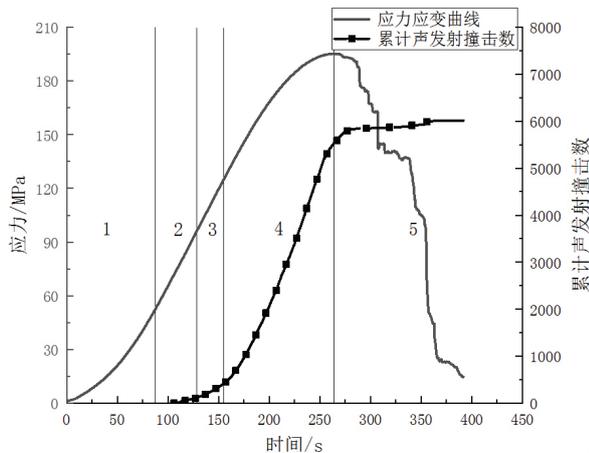


图4 水浸4天的大理岩累计声发射撞击数演化过程与应力应变曲线

射撞击具有不同的演化特点，声发射撞击率对于预测脆性岩石的损伤、破坏具有一定的预测作用。下面给出水浸时间分别为4天,7天和30天的大理岩的声发射撞击率、累计撞击率与累计能量的演化曲线。

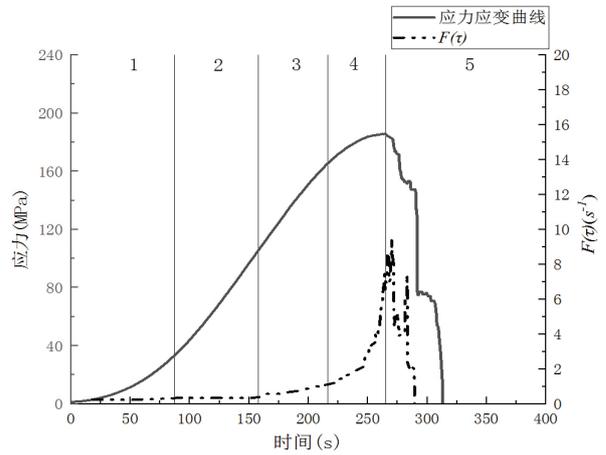


图5 水浸7天的应力—应变— $F(\tau)$ 演化曲线

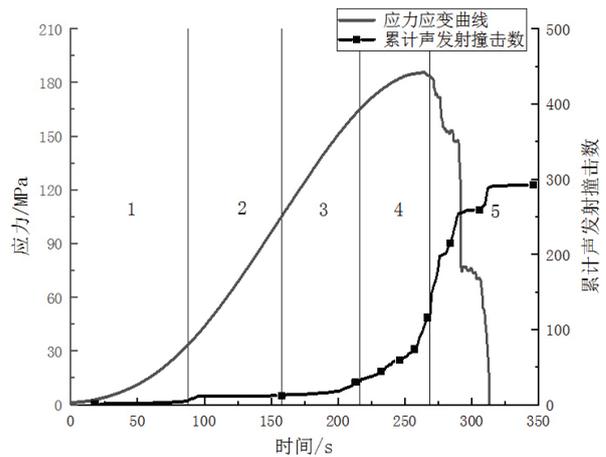


图6 水浸7天的大理岩累计声发射撞击数演化过程与应力应变曲线

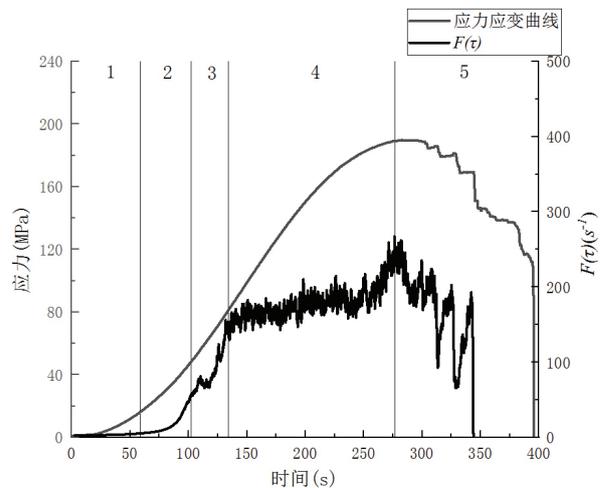


图7 水浸30天的应力—应变— $F(\tau)$ 演化曲线

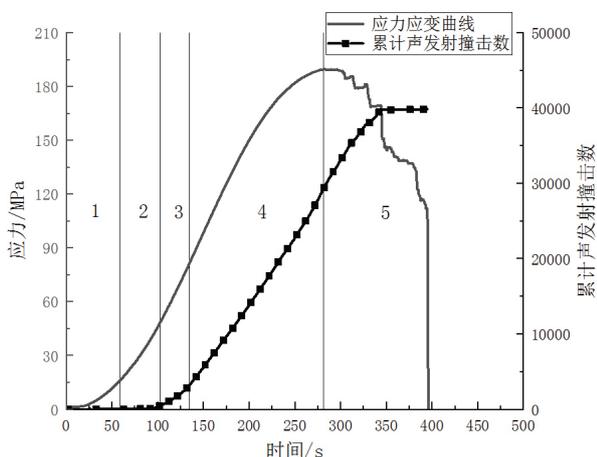


图8 水浸30天的大理岩累计声发射撞击数演化过程与应力应变曲线

通过以上试验结果我们发现：随着水浸时间的增长，大理岩的峰后破坏时间明显得到延长，声发射特征也更加明显。这是由于水进入大理岩表面后，减弱了岩石颗粒之间的抗剪强度，起到了一定的润滑作用，使大理岩破坏模式从脆性张拉破坏向拉剪复合破坏转变。由于剪切破坏中岩石颗粒之间的发生错动，导致了声发射撞击数增加。这表明水浸过程对缓解大理岩的脆性特性具有明显的作用。

小结

(1) 对于不同加载阶段大理岩声发射撞击率演化特征具有显著差异，并依此可以对所处的加载阶段进行划分。

(2) 对于压密阶段和弹性阶段，随着经水浸过程的岩样的声发射撞击率明显小于未水浸岩样，反映了水浸过程使大理岩破坏模式从脆性张拉破坏向拉剪复合破坏转变。

(3) 水浸过程对缓解大理岩的脆性特性具有明显的作用。这对实际工程中降低岩爆发生概率，减弱岩爆强度等级等方面提供了理论支撑。

参考文献

[1] 胜山邦久等. 声发射 (AE) 技术的应用 [M]. 冶金工业出版社, 1996.
[2] 陈炳瑞, 魏凡博, 王睿, 等. 西南地区某深埋隧道花岗岩破坏机制与前兆特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (03): 469-479.
[3] 宋富喜. 岩石声发射实验研究动态及研究成果综述 [J]. 地壳构造与地壳应力文集. 2006 (00): 47-53.

[4] 杨东辉, 赵毅鑫, 张村, 等. 循环加载对沉积岩岩石 Kaiser 效应影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报. 2018, 37 (12): 2697-2708.

[5] 陈颢. 声发射技术在岩石力学研究中的应用 [J]. 地球物理学报. 1977 (04): 312-322.

[6] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究 [J]. 岩土工程学报. 2010, 32 (01): 147-152.

[7] 张艳博, 李占金. 水对大理岩岩爆影响的模拟实验研究 [J]. 河北理工大学学报. 2007 (01): 1-3.

[8] 邓飞, 罗福友, 胡龙飞, 等. 水对岩石物理性质及声发射特征影响研究现状 [J]. 采矿技术. 2013, 13 (06): 37-39.

[9] 方亚如, 蔡戴恩, 刘晓红, 等. 含水岩石破裂前的声发射 b 值变化 [J]. 地震. 1986 (02): 1-6.

[10] 包一峰, 许昭永, 韩明. 含水团山砂岩破裂孕育过程中的 Q 值变化及声发射 [J]. 地震研究. 1990 (04): 396-401.

[11] 唐书恒, 颜志丰, 朱宝存, 等. 饱和含水煤岩单轴压缩条件下的声发射特征 [J]. 煤炭学报. 2010, 35 (01): 37-41.

[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 (05): 914-920.

[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 (04): 53-59.

[14] 王亚东, 张艳博, 田宝柱, 等. 饱水花岗岩巷道岩爆声发射时序特性实验研究 [J]. 煤矿开采. 2016, 21 (01): 12-17.

[15] 王创业, 杜晓娅. 水对花岗岩受力突变声发射主频特性的影响 [J]. 矿业研究与开发. 2018, 38 (07): 32-37.

[16] 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 (06): 1115-1120.

[17] 童敏明, 胡俊立, 唐守锋, 等. 不同应力速率下含水煤岩声发射信号特性 [J]. 采矿与安全工程学报. 2009, 26 (01): 97-100.

[18] TRIANTIS D, KOURKOULIS S K. An alternative approach for representing the data provided by the acoustic emission technique [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, 51(0S8): 2433-2418.S