

复杂裂隙大理岩破坏声发射试验研究*

李银平^{1,2}

¹ 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北, 武汉 430071)

² 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 安全与防灾工程研究所, 上海 200030)

摘要 采用含预制裂隙大理岩块试件, 对压缩应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究。试验表明预制裂纹对试件的影响是显著的。试验观测到不同试件的不同声发射特征, 这表明它们的损伤断裂过程的不同机制。对于一些以张拉型翼裂萌生、扩展为破坏机理的岩样, 还表现出明显的二次峰值现象。锯齿型裂纹的情况较为复杂, 其破坏具有不同于其他试件的特征。破坏之前有相当长一段时间, 声发射也较为活跃, 且增幅越来越大, 破坏时出现最高峰值, 破坏一瞬间的振铃累积数几乎达到全过程的一半, 这表明含锯齿形裂纹的材料破坏更具有突然性和不可预测性, 对岩石材料强度以及岩体稳定性有关键的影响。

关键词 声发射, 大理岩, 翼形裂纹, 锯齿型裂纹

分类号

文献标识码

文章编号

ACOUSTIC EMISSION CHARACTERS OF MARBLE WITH COMPLICATED CRACKS UNDER COMPRESSION

Li Yinping^{1,2}

¹ Key Lab of Geomechanics, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China)

² School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract An experimental approach on the characters of acoustic emission (AE) of marble samples with pre-existing cracks under compression is carried out. The experiment shows that the pre-existing cracks are of significant influence on rock samples. Different acoustic emission characters indicate different failure mechanisms of rock samples with different cracks. For some rock samples, in which the failure is due to the initiation and propagation of tension mode wing cracks, a secondary peak value phenomenon of AE counts is observed. For the samples with pre-existing Zigzag cracks, the failure mechanism is more complicated. In a fairly long time before collapse, acoustic emission is active, and the increasing amplitude of AE counts become larger with increase of load. As the sample whole collapses, AE number reaches a peak value and the accumulated AE counts of failure process occupies almost half of the summation of whole load processes. This reveals that the failure of materials with pre-existing zigzag cracks is more unexpected and unpredictable. The zigzag cracks are of key influence on strength and stability of rock mass.

Key words acoustic emission, marble, wing crack, zigzag crack

1 引言

岩石在荷载作用下发生破坏主要与裂纹的产生、扩展及聚合过程有关。裂纹形成或扩展时, 造

成应力松弛, 储存的部分能量以应力波的形式突然释放出来, 产生声发射现象^[1]。声发射技术是研究岩石力学性质的一种较为有效的声学方法, 人们通过对不同荷载作用下岩体声发射规律的研究, 来推断岩石内部的性态变化, 并将有关成果应用于预测、

* 中科院武汉岩土所岩土力学重点实验室开放基金项目(Z110305)

作者 李银平 简介: 男, 35岁, 工学博士, 现任上海交通大学土木系副教授, 主要从事岩石类材料损伤断裂研究。

预报岩石工程破坏进程及地震发生的前兆。

文[2]对高围压条件下岩石破坏和摩擦滑动过程中声发射活动进行了测定,研究了围压对声发射计数变化特征和阶段划分的影响。文[3]将声发射用于测量岩石破坏过程的信息,预测岩石的破坏类型。文[4]利用声发射探测脆性材料的损伤面。文[5]用声发射测量爆破干扰的影响范围。文[6]对三维应力状态下岩石快速加卸载围压对声发射的影响进行了理论探讨。文[7]通过对加卸荷应力状态下岩石类材料声发射变化的比较,揭示在工程卸荷作用下岩石类材料的声发射特性。文[8]用水泥砂浆模拟含裂隙岩石试样,对含裂隙岩石压剪断裂破坏的内在机理进行了研究。

本文采用含预制裂隙大理岩块试件,对压剪应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究。试验采用声发射来揭示预制裂纹、岩桥等对试件的影响。作为特例对含锯齿型裂纹的情况进行了研究。

本试验采用湖北黄石大理岩作为试件材料,由中科院武汉岩土所提供。试块的外形尺寸是一样的:110mm(长)×62mm(宽)×25mm(厚)。根据预制裂纹的类型和数量不同分为四类试件:1、无裂隙完好试件(a);2、含单个裂纹试件(b-c);3、含雁行裂纹的试件(d-f);4、含锯齿形裂纹的试件(g-i)。

部分试件所含裂纹的长度、倾角及岩桥区尺寸图1所示。

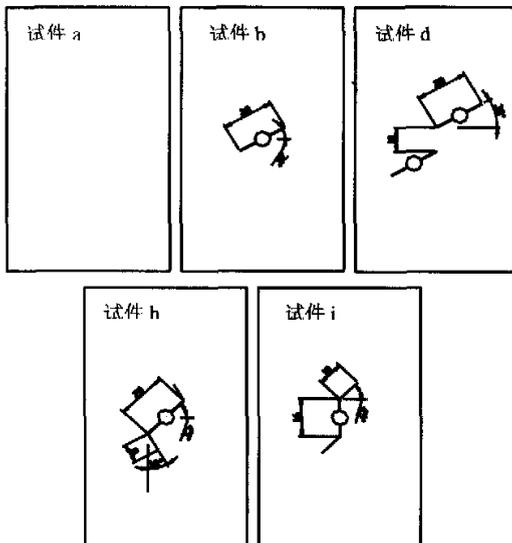


图1 部分试件示意图

Fig. 1 Dimensions of part samples

2 含预制裂隙大理岩压剪试验

加载装置采用 HT-9501 伺服油压万能材料试验机,该机器能自动记录加载时的荷载一位移曲线等。采用东北计算机研究所研制的 AE21C-04 声发射仪探测岩块的损伤和破坏过程。同时在试验过程中用数码相机记录试件的裂纹起裂、扩展及破坏的状况。

如图2所示,用凡士林将声发射探头黏在试件上,并用橡皮筋稍加固定。加载开始后,声发射仪即时记录声发射振铃数和累计振铃数。关于试验的其它详细情况请参考文献[9]。

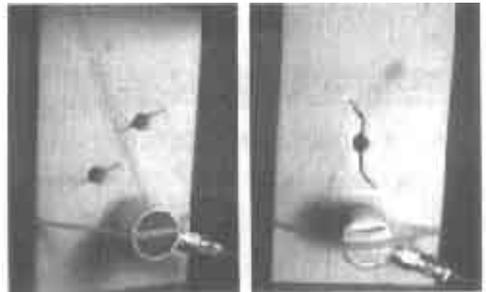


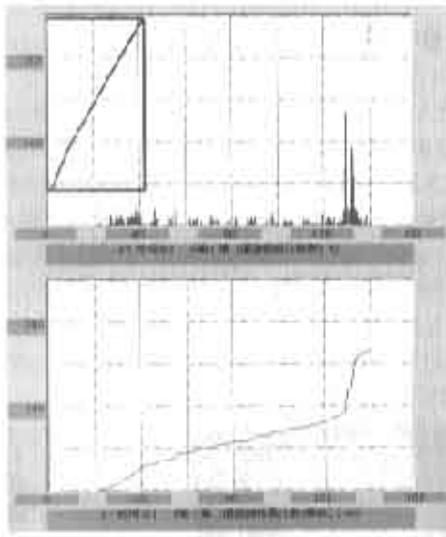
图2 装有声发射探头的试件(从左至右分别为试件 d 和 i)
Fig. 2 Samples d and i with AE sensors

本试验采用等应变加载方式,加载速率为0.2%/min。单轴压缩荷载下,裂纹扩展的基本特点是以原生裂纹端部为突破口产生翼形裂纹。翼形裂纹开始是一条较窄的白色带,表明大理石内部大小晶粒之间的脱开及穿晶破坏。当继续加载时白色区变深并延伸,雁行裂纹则搭接贯通,最终导致试件的失稳破坏。通过对破坏后试件的观察,宏观裂纹有两类,一类裂纹非常整齐,裂纹面较为平整,显示为张拉破坏;另一类则很毛糙,裂纹面呈锯齿状,表明为压剪破坏。

3 大理岩破坏过程的声发射特征

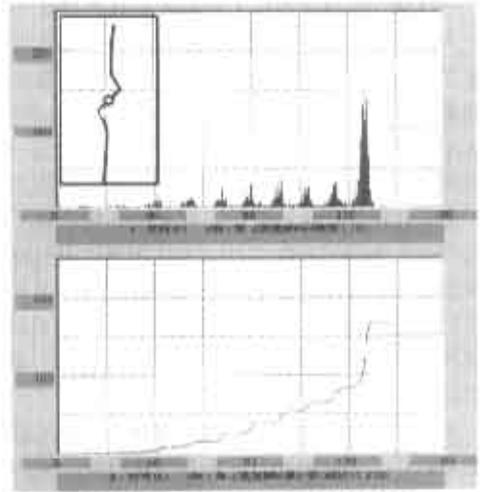
在荷载作用下岩石类材料将产生损伤,进而发生失稳破坏,其宏观的破坏现象是许多微观破坏的综合表现。声发射作为一种反映岩石内部状态变化的工具,其活动性反映了岩石微观破坏的活动性,它直接与岩石内部缺陷的演化繁衍有关。

图3所示,为试验中测得的部分试件声发射振铃数随时间变化的关系图,以及振铃累积数与时间的关系曲线。

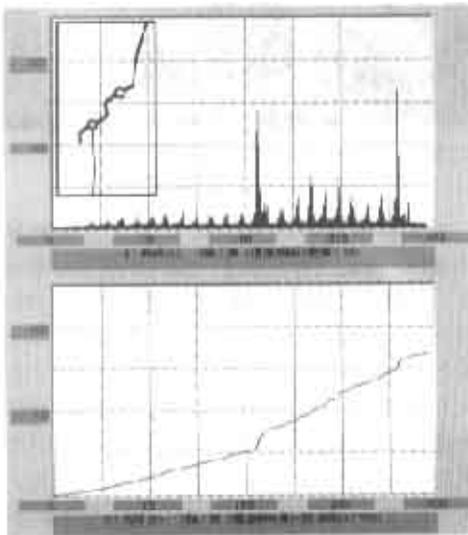


(a) 试件 a 振铃数及振铃累积数与时间关系图

(b) 试件 d 振铃数及振铃累积数与时间关系图



(c) 试件 h 振铃数及振铃累积数与时间关系图



(d) 试件 i 振铃数与时间关系图

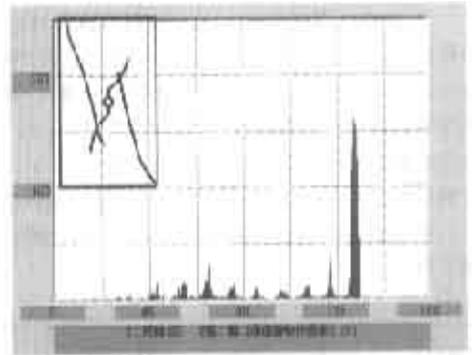


图 3 试件声发射图和试件破坏示意图

Fig. 3 AE counts and failure manners of samples

总的来看, 声发射具有如下特征: ①在压密阶段及弹性阶段, 有小振幅的声发射产生, 较为平稳; ②对含裂纹试件来说, 当翼形裂纹、二次裂纹开始起裂, 声发射明显增多; ③在裂纹的非稳定扩展直至形成宏观裂纹阶段, 声发射急剧增多, 出现峰值后, 试件马上破坏。

当然, 不同试件的声发射特征是不同的, 这表明了它们的损伤断裂过程的不同机制。图 3 列出了几种比较有代表性的几种试件的声发射图。

图 3(a)为完整试件 a 的声发射振铃数及其累积数和时间关系图, 可以看出, 从加载到破坏前是一

个相当平稳的过程, 累积数线性缓慢上升, 破坏时出现峰值, 累积数陡然增加 6000, 表明试件的突然整体破坏。试验中观察到由于岩石材料的不均质性, 开始随机的产生一些破裂, 但随着荷载的增加, 破裂逐步集中于一破裂带内, 最终导致试样整体破坏。声发射基本上反映了试件破坏过程内在机理。

试件 d 含有两个偏置平行裂纹, 加载时观察到了翼形裂纹的萌生和扩展, 岩桥区裂隙搭接时两裂尖几乎是直线相连, 很是齐整, 表明为拉伸破坏, 见图 3(b)中试件破坏方式示意图。在另端的翼裂几乎是竖向将试件劈开, 没有观察到二次裂纹的出现。

图 3(b)所示,为试件 d 的声发射图,可以看出,有两个明显的峰值,累积图上清晰的出现两处陡坡,第一个陡坡表明预制裂纹尖端开始引发翼裂和二次裂纹,且扩展极快,然后开始稳定扩展,直至最后整体失稳破坏。从图中还可以看出,初始阶段的振铃累积数斜率较小,而第二阶段坡度较大。试验表明,含单一裂隙试件和含雁行裂隙试件的声发射图相似,这也表明其破坏过程的相似性。试验中观察到,加载后试件中翼形裂纹较早产生,且几乎一开始就是沿着主应力方向扩展,试件较快就失稳破坏了。而裂纹倾角较大的试件,试验中不仅观察到了翼形裂纹萌生和扩展,同时也观察到了二次裂纹,即沿原裂纹方向的裂纹,整体破坏时宏观贯通裂纹是由二次裂纹发展而成的。所以,声发射较好的反映了试件破坏过程的阶段性。

锯齿形裂纹是针对岩石类材料的复杂性和非均质性而提出的,文[10]对该类裂纹裂尖应力场进行了分析。试件 h 和 i,预制裂纹为锯齿形裂纹,试验表明:锯齿形裂纹的方位(相对于荷载方向)对试件的性能影响十分显著。试件 h,初始翼裂与主裂方向成 75° 角,加载时,翼裂继续扩展,且逐渐曲向和荷载方向一致,最终破坏。试件 i 则较为复杂,主裂沿荷载方向,翼裂与主裂成 45° 角,加载时,翼裂尖端引发翼裂和二次裂纹,然后在翼裂的反方向引发裂纹,最终的破坏是由反向裂纹扩展引起的,破坏时张开的翼裂已几乎闭合了。图 3(c)和(d)为含锯齿形裂纹的试件的声发射图,由图可见,和完整试件类似,破坏时出现最高峰值。但和完整试件不同的是,加载过程中,破坏之前有相当长一段时间,声发射也较为活跃,且增幅越来越大,由振铃累积数图可见,破坏一瞬间的振铃累积数几乎达到全过程的一半。试验中观察到,如图 3(d)中所示试件破坏示意图,锯齿形裂纹的破坏并不都是由翼形裂纹萌生和扩展引起的,而是由于翼裂反向裂纹的突然产生导致失稳。因而含锯齿形裂纹岩石材料或岩体的失稳破坏更具有突然性和破坏性值得进一步研究。

4 结 论

本文采用含预制裂纹真实岩块试件,对压剪应

力场中试件破坏过程声发射特征做一个初步的探究。主要结论归纳如下:

1. 预制裂纹对试件的影响是显著的。不同试件的声发射特征是不同的,这表明它们的损伤断裂过程的不同机制。
2. 对于一些以张拉型翼裂萌生、扩展为破坏机理的岩样,声发射表现出明显的阶段性,振铃数出现二次峰值现象,这应该能为含结构面岩体的稳定检测提供参考。
3. 锯齿型裂纹的情况较为复杂,含锯齿形裂纹试件的破坏具有明显不同于其他试件的特征。破坏之前有相当长一段时间,声发射也较为活跃,且增幅越来越大,破坏时出现最高峰值。由振铃累积数图可见,破坏一瞬间的振铃累积数几乎达到全过程的一半,这表明含锯齿形裂纹的材料的破坏更具有突然性和不可预测性,对岩石材料强度以及岩体稳定性有关键性的影响。

参 考 文 献

- 1 秦四清等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993
- 2 张流等. 高压下岩石破坏和摩擦滑动过程中的声发射活动性[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1): 38~47
- 3 Mansuro V A. Acoustic emission from failing rock behavior [J]. Rock Engng, 1994, 27(3): 173~182
- 4 Holcomb D J, Costin L S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions [J]. Trans ASME, 1986, 53: 536~544
- 5 Li C, Nordlund E. Assessment of damage in rock using the Kaiser effect of acoustic emission [J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, 30 (7): 943~946
- 6 陈忠辉, 傅宇方, 唐春安. 岩石破裂声发射过程的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16 (1): 65~70
- 7 吴刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82~85
- 8 刘东燕, 朱可善, 胡本雄. 含裂隙岩石受压破坏的声发射特性研究 [J]. 地下空间, 1998, 18(4): 210~215
- 9 李银平等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 26(1): 120~124
- 10 李银平, 王元汉. 压荷载下类岩石材料中的锯齿形裂纹分析[J]. 固体力学学报, 2003, 24(4): 456~462

作者: [李银平](#)

作者单位: [中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学重点实验室, 湖北, 武汉, 430071; 上海交通大学, 船舶海洋与建筑工程学院, 安全与防灾工程研究所, 上海, 200030](#)

相似文献(10条)

1. 会议论文 [周忠良, 屠晓利](#) 大理岩单轴受压破坏过程的声发射特征研究 2007

本文在刚性试验机上,对大理岩进行了单轴受压破坏全过程的声发射试验.试验采用完整和含天然裂隙两种试样,并对完整试样采用不同的加载速度,得到了大理岩的力学特性和声发射特征,包括应力-应变曲线、全过程的声发射事件时间分布和声发射高频信号的频率分布等.研究表明:加载速度快大理岩更容易产生声发射信号现象;声发射信号的两个峰值期是在最大应力前后两个时间点.而不是在最大应力时,其中后者说明了岩石残余应力的存在;大理岩声发射有高频率高幅值信号产生,这些高频信号的频段分布范围相同.

2. 期刊论文 [李银平, 曾静, 陈龙珠, 王元汉](#) 含预制裂隙大理岩破坏过程声发射特征研究 -地下空间2004, 24(3)

采用含预制裂隙大理岩块试件,对压剪应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究,试验表明预制裂纹对试件的影响是显著的.试验观测到不同试件的不同声发射特征,这表明它们的损伤断裂过程的不同机制.对于一些以张拉型翼裂萌生、扩展为破坏机理的岩样,还表现出明显的二次峰值现象.锯齿型裂纹的情况较为复杂,其破坏具有不同于其他试件的特征,破坏之前有相当长一段时间,声发射也较为活跃,且增幅越来越大,破坏时出现最高峰值,破坏一瞬间的振幅累积数几乎达到到全过程的一半,这表明含锯齿形裂纹的材料破坏更具有突然性和不可预测性,对岩石材料强度以及岩体稳定性有关键的影响.

3. 会议论文 [樊运晓](#) 大理岩单轴压缩时声发射的试验研究 2000

通过岩石结构模拟,以大理岩为例分析并通过单轴压缩试验验证了声发射产生的主要原因在于岩石内部裂纹的闭合和闭合裂纹上下表面间的摩擦,加载过程中声发射信号的强弱与岩石内部裂纹平均长度有关;用平均裂纹反映岩石的损伤,声发射Kaiser效应较好地记忆了岩石的先前损伤.

4. 学位论文 [周忠良](#) 岩石声发射信号特征与分析方法研究 2006

岩石破坏必然产生声发射现象.岩石是一种依赖于材料性质和外部条件的复杂变形体,因此,不同种类、不同条件下的岩石(岩体)声发射信号特征也不同.深入研究不同条件下岩石(岩体)声发射特征,可以了解岩石的破坏机理,对监测岩体的稳定性,预报可能发生的事具有重大意义.另外,合适的声发射信号处理方法对研究岩石破坏机理,分析破坏模式也是至关重要的.本文采用目前先进的美国PAC公司生产的PCI-2便携式声发射系统,采集不同条件下单轴压缩大理岩声发射信号和爆破现场岩体的声发射信号,利用小波分析方法并结合其他方法对信号进行分析.

本文的主要研究工作有:

1、对比介绍多种声发射信号处理方法,系统的介绍了小波分析方法.利用小波分析方法对接收到的声发射信号进行处理,实践证明小波分析对声发射信号降噪和提取特征信号具有很好的效果,并且对于声发射信号不同频段的波形分离也是一种非常有效的手段.

2、在刚性试验机上,对大理岩进行了单轴压缩破坏全过程的声发射试验.试验采用无明显裂隙和含天然裂隙两种试样,对完整试样采用不同的加载速度,得到了大理岩的力学特性和声发射特征,包括应力-应变曲线、全过程的声发射事件时间分布和声发射高频信号的频率分布等.

3、利用声发射系统对爆破现场的岩体声发射信号进行了采集,对采集到的信号结合岩体冒落现象进行了系统分析.通过与实验室试验声发射信号对比发现,本次岩体冒落全过程声发射信号统计特征与单轴压缩下岩石破坏特征比较相似,只是岩体破坏声发射信号的周期较长.

5. 会议论文 [易小平, 辉长岩和大理岩短棒试件测中的声发射\(AE\)特性](#) 1988

文中应用ISBH岩石断裂韧度建议方法中的短棒试件来研究卡莱克思辉长岩和比约卡大理岩短棒试件测试中的AE特性.每个试件被加载至不同的载荷水平,然后卸载,并再加载至一个较低的载荷水平.试验结果表明:AE频度在载荷增至峰值的25%出现,然后缓慢增加;当载荷越过峰值并减至峰值的53%至73%时,AE频率顿时增加4倍左右,然后逐渐减少.文中出现AE频度的突然增加是由于裂纹跳跃式扩展(局部失稳扩展)而产生的.试件卸载时,AE频度在很短时间内减至零,此时的载荷在卡莱克思辉长岩和比约卡大理岩中分别为卸载载荷的91%和95%.以该点为切点做切线所获得的“卸载切线”用来代替本法II级测试中“线性化柔度线”更为合理.(本刊录)

6. 会议论文 [付小敏](#) 大理岩单轴压缩变形及声发射特性试验研究 2004

声发射是岩石在受力变形和破裂过程中的重要物理现象,也是反映岩石力学特性的一个直接参量.介绍了大理岩单轴应力-应变及声发射全过程特征,并作了对应分析,结果表明岩石的变形速率与岩石声发射事件出现的频率有较好的对应性.

7. 学位论文 [张宝生](#) 煤岩声发射特性的研究与大理岩Kic的测定 1989

8. 期刊论文 [江进辉, 郭琴玲, 周创兵, 李俊平, 余志雄, 戴跃华, 孟刚, 陈从新, 刘才华, JIANG Jin-hui, GUO Qin-ling, ZHOU Chuang-bing, LI Jun-ping, YU Zhi-xiong, DAI Yue-hua, MENG Gang, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua](#) 大理岩受压

声发射研究 -中国农村水利水电2005, ""(11)

在单轴压缩条件下,分别研究了天然含水、浸水饱和和施加渗流岩石的声发射特性.研究表明:在低应力阶段,渗流不能引起AE活动,一般在单轴压力达到岩石强度的60%~80%、临近破坏时,加渗流和停止渗流的瞬间均会产生较大的AE事件,从稳定渗流到停止渗流一般接收不到明显的AE信号;岩石在荷载作用下的变形破裂特性与该过程中的声发射现象紧密相关.从平均意义的能量和形变角度分析,得出平均能量和平均形变在试件破裂过程中的变化是同步的,浸水饱和和岩石较天然含水岩石的平均能量小、平均形变大的结论,并根据岩石破裂损伤机理给以解释.

9. 会议论文 [马群, 秦乃兵, 徐东强](#) 白色大理岩试块受压破坏分析 2001

本文针对白色大理岩矩形中间带圆孔试块进行双向受压时观测到的破坏现象,进行了解析分析.在此基础上,对试块进行了破坏分析.

10. 期刊论文 [张艳博, 李占金, ZHANG Yan-bo, LI Zhan-jin](#) 水对大理岩岩爆影响的模拟实验研究 -河北理工学院学

报2007, 29(1)

通过双向加载模拟了大理岩含水与干燥情况下的岩爆,记录了声发射特性.分析了含水与干燥情况下岩爆现象、声发射特性及其原因.提出水对防治岩爆的积极作用和声发射预测岩爆的可行性.