

人工边坡稳定性 AE 监测的实践和展望

霍臻, 陈翠梅, 汪道林

(武汉安全环保研究院, 武汉)

摘要: 工程建设中, 常在自然山地上开切人工边坡, 一旦滑坡将造成巨大损失, 实践表明: 声发射技术能有效捕捉滑坡的前兆, 从而进行预报。岩体 AE 检测技术是岩质工程结构受力破坏的实时动态检测方法, 具有测点监控范围大, 实时提供信息等优点。AE 信号参数与岩质工程结构受力产生破裂损伤或破坏紧密关联, 三峡永久船闸边坡稳定性 AE 监测的实践表明, 根据 AE 数据的变化及“突变”, 对边坡岩体、稳定性及其发展趋势, 进行评价, 是有效的。国内外已经研制出 AE 源定位应用于岩体工程检测的仪器, 通过分析检测到的三个方向的 AE 波形, 确定 AE 源具体位置, 进而用地震学科中的反演方法, 反演出 AE 源释放出的能量(“震级”), 从而定量地对岩体工程进行检测。本文也将对这方面最新技术的发展和应用作一阐述和展望。

关键词: 人工边坡; 声发射; 监测

ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF THE SLOPE STABILITY OF THE PERMANENT SHIP LOCK FOR THE THREE GEORGES PROJECT

Huo Zhen, Chen Cuimei, Wang Daolin

(Safety and Environmental Protection Research Institute)

Abstract: The AE detection technique of rocks is an on-line dynamic detection method for rock Engineering projects when the stress is damaged. The AE signal parameter is closely related to the failure, fracture or damage of the stress of rock structure, and it has dominant advantages such as wide monitoring extent, live information. All-weather automatic continuous monitoring and data processing for the ship lock have been achieved for AE monitoring of the slope stability of the permanent ship lock of the Three Georges project dam. Based on the variation of AE data and “discontinuity”, the stability of slope rock and its development tendency can be evaluated. It also affords timely effective basis for consolidation of the portion of the slope rocks of fractured and damaged stress for the ship lock.

Keywords: Slope stability; Acoustic emission; Monitoring

一、概述

永久船闸是三峡水利枢纽建设的主体工程之一, 设计为双线五级船闸, 两线闸室间为 50~70m、宽 60 m 的直立中隔墩, 属在山体中露天开挖建设的岩质工程建筑物。船闸南北两侧最终形成上缓下陡岩质边坡, 边坡开挖与永久支护加固过程中的稳定与局部垮落, 将影响工程进度, 威胁施工人员及设备的安全。为了防止因滑坡而发生的灾害, 尽早地捕捉滑坡前的前兆, 采取适当的处理对策是必要的。以前, 通过测量地面位移或测量所

安设的锚杆的载荷等方法来预测滑坡，但是，作为滑坡前兆的微小现象，在位移和载荷等方面并不敏感，所以根据这种测量结果对边坡的滑坡进行准确预测通常是困难的。尤其对于大部分岩体，在许多场合外观上无任何变化时突然发生滑坡。

AE 是伴随边坡内部的微小破裂和变形而发出的声音，它是滑坡早期发生的现象，因此对边坡滑坡的早期监测是有效的。在山体中开挖建设永久船闸边坡过程中，人为地使地层应力状态向不稳定的方向变化，因此伴随着挖掘的进行，判断地层是否能保持稳定的状态是非常重要的。

受中国三峡工程开发总公司的委托，武汉安全环保研究院根据永久船闸开挖工程的实际，于 1998 年底将 AE 技术应用于永久船闸右线二、三闸室南直立坡、左线闸室北直立坡岩体稳定性监测。

二、三峡岩体声发射特征及其检测技术

1、岩体声发射检测技术特点

岩体声发射是伴随岩体受力破坏过程产生的一种自然现象，与岩体破坏紧密相关。岩体在力的作用下，其内部存在缺陷（包括裂纹）或不均质部位，首先储蓄着应变能，当这种应变能储蓄到一定程度（或者说数量）时，即以弹性波（或者声波）的形式释放，并由源点向四周介质传播开去，通常称这种现象为岩体声发射现象。大量的岩石室内试验及现场检测试验表明：随着岩体受力破坏的加快，声发射现象明显增多。显然，岩体声发射现象可以为岩质工程稳定性评价与危险状态预测预报提供有效的信息。

从上述岩体声发射现象的基本概念可知，岩体声发射检测技术有如下特点：

- (1)岩体声发射是由源点向四周介质传播开去的，可以实现破坏源点的检测定位。
- (2)岩体声发射现象与岩体受力破坏相关，是一种岩体动态实时检测，检测结果直观。
- (3)一个测点可以监控一定范围内岩体的受力破坏。

2、三峡岩体声发射特性研究

为了深入了解永久船闸边坡花岗岩声发射信号特征，探索有效处理现场数据的方法，在实验室对永久船闸边坡花岗岩进行压力试验，为永久船闸边坡的 AE 监测提供参考。

（一）本次实验分别采用 YE—200A 型电动压力机，MTS 液压伺服钢性压力机对岩样进行单轴全过程加压。用 YSC 数字声发射仪采集波形信号，本系统是基于 RS232 速串行通信的一对多通道声发射数据采集分析系统，下位机采用 89C51 单片机，40K12bitA/D 采样对声发射数据进行采集，然后通过波特率为 115200RS485 串行口将数据传递到上位机。用 YSS 模拟声发射仪记录声发射特征参数（大事件、总事件和能率）。

（二）实验用岩样

用打钻的方式分别在长江三峡永久船闸南北坡钻取直径约为 $\phi 90\text{mm}$ ，长度不等的岩样，然后按照《中华人民共和国行业标准（水利水电工程岩石试验规程）》中第 5.2 节单轴抗强度试验标准加工了 $\phi 50\text{mm}$ 与 $\phi 90\text{mm}$ 两种岩样共 9 块，其参数见表 1。

表 1

编 号	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	S ₁	S ₂	S ₃
平均直径 mm	90	89	88	91	90	90.5	50.05	50.12	50.03
平均长度 mm	218	217	220	218	219	220	128.3	127.8	122.2

(三)测试方法

(1) 用 YE—200A 型普通压力机进行加压试验，共压 d₁~d₆ 总计 6 块岩样。加压过程中，在岩样相对两侧放两根刚性很好的钢管，以增大压力机刚度。以约 0.05Mpa/s 加载速率加压，保持压力 3~5 分钟采集声发射数据，然后再加压，当到下一个压力水平时再保压 3~5 分钟，直至岩样完全破坏为止，则加压结束。一般每块岩样需 8~15 个压力水平，以便采集声发射信号用于分析试样不同应力水平声发射源的特性。

(2) 用美国 MTS 公司生产的 MTS815 型电液伺服压力机，用计算机控制，以 $5 \times 10^{-7}/S$ 的应变速率加压，全程采集声发射数据。并同时测量和记录纵向应变和环向应变。

声发射数据信号，通过传感器拾取，前置放大器放大，模块采集并传输至计算机（YSC 岩体声发射监测仪）贮存和分析，同时采集全过程声发射波形信号。图 2 为实验时的图片（实验压力机、岩样）。

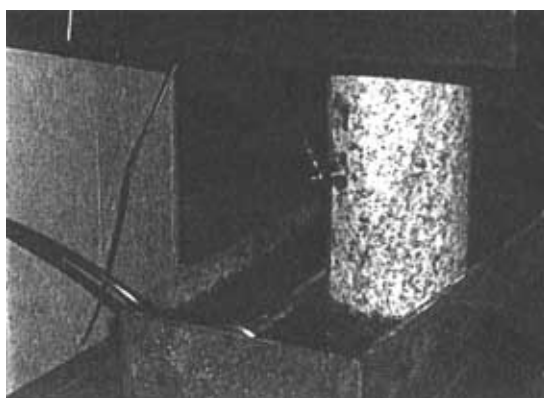


图 2 实验压力机、岩样

(四) 试验结果

室内岩石试样声发射试验与现场声发射监测，尽管因岩体与岩样存在地质性态（岩体结构的各向异性、地质构造与结构面）几何尺寸、受力状态等的差别，可能引起声发射传播产生某些差别（如吸收、折射、反射、绕射等），但是岩石、岩体受力破坏和声发射信号产生的机理是相同的，因此，试验的结果可供现场参考。

(1) 花岗岩的声发射非常丰富，能充分反映永久船闸边坡的变形受力状态。

(2) 当岩样应力达到 15—20%脆性破坏应力，应变达到 1%的脆性破坏应变时，即出现明显的声发射，说明声发射能灵敏反映出岩石的受力和变形信息。在现场只要测孔布置合理，监测仪器灵敏度适当，连续监测，是完全掌握岩体动态的。

(3) 声发射参数随岩体(石)的应力和变形增加而增加,在脆性破坏(应力达极值)时达到一个峰值,尔后声发射总体上处于较 的数量级,直至变形继续增大至岩体完全破坏时,声发射参数达到极大值。

(4) 在永久船闸边坡监测中,神经网络是当前区分声发射信号和噪声的最佳方法,也是本学科和其他相关的学科的研究前沿。

图 3 为岩样 S₁ 的应力——应变全过程曲线图

图 4 为典型声发射图

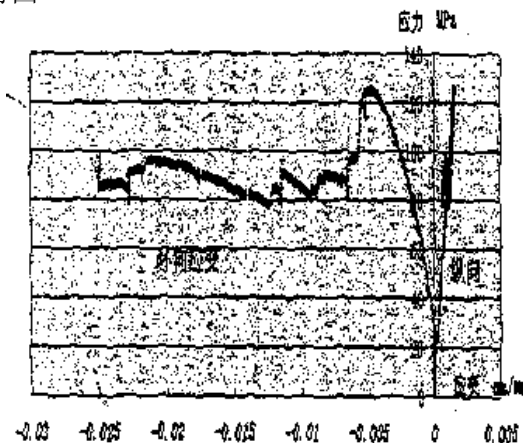


图 3 岩样 S₁ 应力—应变全过程曲线图

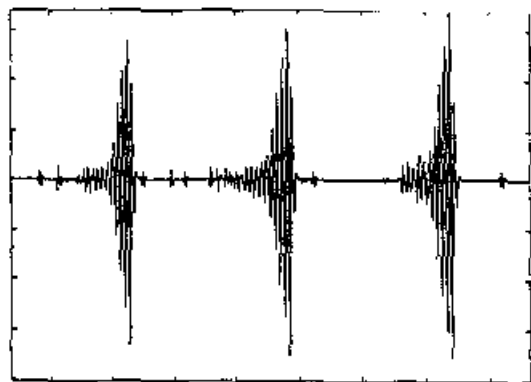


图 4 为典型声发射信号波形

3、仪器系统的结构特点

岩体声发射检测系统由主控机、交直流电源组、通讯计数板、探头等组成。见图 5, 仪器系统具有抗干扰性强,实现全天候自动化检测与数据处理,及时提供信息等突出优点。每套仪器具有 8 个通道,每个探头监控半径为 15~20m 的球体范围,即两探头间直线距离

可达 30~40m。应用三套仪器系统于永久船闸右线二、三闸室南直立坡及左线三闸室北直立坡岩体稳定性监测，三台主控机分别放置在 1[#]~3[#]监测站房内，探头放入直立坡上的 SR-1~NR3-39 等 39 个测孔中，其中第一台仪器系统监控边坡长度 247m，第二台仪器系统监控边坡长度 294m，第三台仪器系统监控边坡长 244m。图 6.1 为永久船闸边坡及监测站房；图 6.2 为测孔口。

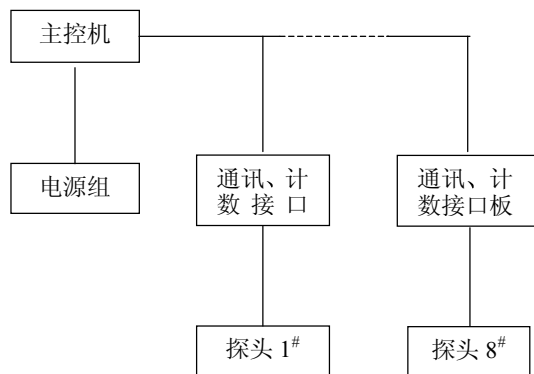
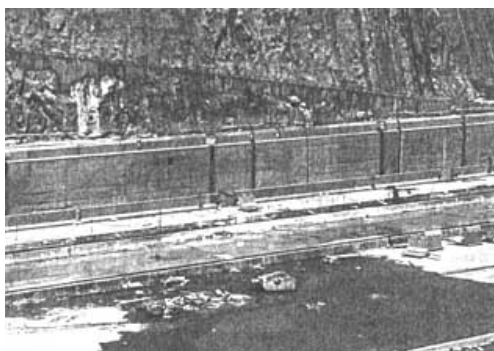


图 5 声发射检测系统



6.1 永久船闸边坡



6.2 测孔口

4、人工神经网络声发射信模式识别的应用

本系统采用多层前馈神经网络对实际声发射检测采集资料进行了声发射信号模式识别，神经网络为采用自动初始值设定、动量加学习速度自适应 BP 算法结构网络。还包括 FFT 分析、功率谱分析等，以排除爆破、钻孔、捶击等施工机械作业时产生的干扰信号。试验结果效果良好。

三、边坡岩体声发射与边坡稳定性分析

三套声发射检测系统实现全天候自动化连续监测和数据采集与处理。自 1998 年 11 月投运至今的 22 个月当中，检测到边坡岩体声发射事件总数为 57634 个，如此众多的数据在时间上的分布与边坡开挖、加固等工程的进程紧密相关。另外，由于岩性、构造以及边坡形态等的不同，各测孔所检测到的声发射事件数量亦有明显的差异。从而可以根据声发射数据的变化判断边坡岩体稳定性及其随时间的发展趋势。

1、永久船闸右线二、三闸室南直立坡岩体声发射与边坡岩体稳定性

永久船闸右线二、三闸室南直立坡由两台岩体声发射检测系统监控，布设有 SR2-1~SR3-25 等 25 个测孔，监控边坡总长度 541m。各测孔检测到的声发射事件数随时间分布的特点是：

(1)所有测孔声发射事件数量随时间而呈减少趋势。边坡岩体声发射总事件数亦逐月减少，尤其 1999 年 7 月份以后减少最明显。如 1999 年 1 月边坡岩体声发射总事件数为 47394 个，2000 年 8 月份总事件已减少到 1673 个，见表 2，边坡岩体声发射总事件数随时间变化见曲线图 6，由表 2 及图 6 可看出：

永久船闸在大规模爆破开挖过程中，由于爆破震动效应，对边坡岩体造成一定程度的损伤，随着爆破开挖接近完成，每次爆破的药量逐渐减少，边坡岩体受到的损伤也相应减少，1999 年 7 月份爆破开挖工程基本结束，因而，边坡岩体所受到的爆破振动损伤明显减少。另一方面，在船闸直立坡所进行锚索加固等措施已有效地抑制岩体受力破坏与损伤进一步发展，取得了良好效果。边坡岩体声发射随时间而呈减少的趋势，反映边坡趋于稳定。

表 2 右线二、三闸室南直立坡月声发射总事件数计表

时 间	年 月	1999 年										2000 年									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
声发射 事件数 (个)		47349	47256	41953	40872	38936	33036	13056	12292	8856	7200	8317	6024	7132	7130	4464	2896	3118	2362	1862	1673

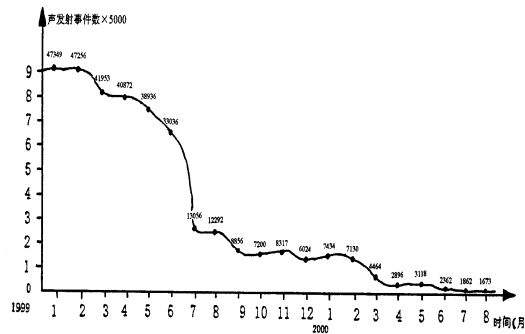


图 6 右线二、三闸室南直立坡声发射事件数变化曲线

2、几个声发射事件数较 测孔所在位置的局部边坡稳定性

三台检测仪所监控的测孔当中，SR2-5、SR2-11、SR3-14、SR3-25 及 NR3-26 等 5 个测孔所检测到的声发射事件数是该台仪器所监控的测孔当中相对较 的。其主要原因是：SR2-5、SR2-11、SR3-14、SR3-25 及 NR3-26 等四个测孔均位于闸首与闸末部位，这些部位坡面形状变化大，有的边坡岩体甚至三面临空。岩体受力情况较为复杂，存在应力相对集中现象，岩体受力破坏相对加剧，而 SR2-5 测孔虽然位于闸室中部的边坡上，坡面平整，但是我们现场勘察，发现该段边坡加固措施相对滞后。1999 年 5 月底完成锚固施工后，有效地抑制了边坡岩体受力引起的开裂现象。其声发射事件数随即明显减少，见表 3，截止 2000 年 3 月份已降低为正常水平。

表 3 1999 年 SR2-5 测孔声发射事件月统计表

时 间	年 月	1999 年												2000 年		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
声发射 事件数 (个)		12120	7128	7919	21672	20473	6048	1140	1270	2570	1120	696	420	113	96	48

3、船闸左线三闸室北直立坡岩体声发射与边坡稳定性分析

左线三闸室直立坡由第三台声发射仪监控 NR3-26-NR39 等 14 个测孔。由于其它原因使得这台仪器于 1999 年 10 月份才得以安装投运，截止目前，此台仪器检测到声发射事件总数为 20593 个，每月的声发射事件数见表 4。

表 4 左线三闸室直立坡月声射事件数统计表

时 间	年 月	1999 年			2000 年								
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
声发射 事件数 (个)		4991	4002	3072	3608	1264	1106	685	547	626	434	206	210

实际上，此台仪器投运时，永久船闸已基本完成爆破开挖工程并开始进行了大规模的船闸直立坡锚固工作，表 4 表明边坡岩体声发射事件数随时间进程明显减少，说明在永久船闸左线三闸室北直立坡所进行的加固措施得了明显的效果，边坡趋于稳定。

4、声发射事件急剧增加与边坡岩体受力开裂损伤或失稳

1998 年 12 月 25 日至 1999 年 1 月 24 日的一个月时间当中，SR2-4、SR2-5 及 SR2-7 等三个相邻测孔，同时出现过三次在较短时间内声发射事件急剧增加的现象，即在 1998 年 12 月 28 日、1999 年 1 月 7 日、1 月 18 日等 3 天都同时出现声发射事件急剧增加的所谓声发射事件“突变”异常现象，数据见表 5。由表中可看出，此三个相邻测孔的声发射数据不仅在同一天出现异常增加，而且一次比一次地增多，说明该段边坡岩体在此时间段内，多次受力引起损伤破裂。1999 年 1 月 24 日在此三测孔所在部位的边坡马道上发现一条长约 6m 宽 3mm 左右的裂缝，经过采取锚杆加强支护后，该裂缝的延伸速度方才逐渐减少，趋于停止。

表 5

时间 声发射信号资料 测孔号	98 年 12 月 28 日			99 年 1 月 7 日			99 年 1 月 18 日		
	总事件	能率	大事件	总事件	能率	大事件	总事件	能率	大事件
SR2-4	24	240	0	48	2400	0	528	9360	120
SR2-5	336	3840	0	1128	24000	408	960	19680	384
SR2-7	48	240	24	24	0	0	528	7920	168

四、结论

通过以上声发射资料与边坡岩体稳定性分析，我们得到如下启示与结论：

1、永久船闸在爆破开挖过程中，右线二、三闸室直立坡及左线三闸室北直立坡岩体产生声发射事件频度最 时仅为 1 个事件/10 分钟，类比其它工程而言，比较低。且随着

时间进程呈下降趋势，尤其是自 1999 年 7 月基本结束爆破开挖以后，声发射事件数随即明显减少。说明边坡岩体受力损伤、开裂并不严重。而产生损伤或开裂的原因，主要是爆破震动效应所致。已经实施的边坡加固措施，有效地抑制了岩体受力可能产生损伤或开裂，取得了良好效果，随着加固工程的进展与完成，边坡岩体趋于稳定。

2、船闸闸首和闸末的边坡区段，坡面形状变化大，或者存在断层等地质弱面的边坡区段，声发射事件数明显增加，边坡岩体受力破裂、损伤较为严重，根据声发射检测结果，及时地对边坡岩体进行加固支护，可以取得良好效果。

3、某些测点声发射资料短时间内出现急剧增加的异常现象，可能是该测点所监控范围内的边坡岩体受力急剧增加，岩体产生破裂损伤，或将发生岩体失稳垮落。

4、岩体声发射检测技术是岩质工程结构受力产生破裂、损伤或垮落的实时动态检测方法，具有一个测点监控范围大、全天候自动化连续监测与数据处理、提供信息及时等突出优点。能有效监测边坡岩体稳定性及其发展趋势，从而为边坡加固技术设计提供更加有效和符合实际的依据。

五、岩体 AE 检测技术新进展展望

声发射检测技术应用在岩质结构中，目前国内用得比较成熟的是检测声发射事件数、相对能量以及波形采集。类似的仪器系统国内有多家单位研制，并成功地应用于工程当中。用多探头进行声发射源定位的仪器系统国内已研制成功，并已有单位正在研制用单探头（三轴向探头）进行声源定位的设备。

国际上象南非、日本、美国、英国、加拿大等开发出的声发射仪器应用于矿山边坡结构，石油勘测，核废料场，主要是检测声发射源的位置及“震级”大小。

国内外用声发射检测岩质结构稳定性的发展方向是：借鉴地震技术，朝着地震监测技术和手段方向发展。即利用单探头确定声发射源位置及大小。多探头组成的探头阵定位声发射源要求声发射源在探头阵所包含的范围内，这在工程监测中不易做到，单探头监测声发射是记录三个正交方向的声发射波形，对波形进行分析，分离出 P、S 波，根据 P、S 波到达时差和三个方向上的分量大小确定声源位置，根据接收到的声发射信号振幅强度，声源距离（声源位置）以及应力波衰减关系，确定声发射源强度，用声发射源位置和“震级”大小这两个指标达到评价岩质结构稳定性之目的。但比起地震监测来说，声发射监测在技术上相对要求较高，其一，声发射信号相对来说更弱，这就要求使用的传感器灵敏度更高，同时必须发展软的或硬的抗噪技术，比如用小波分析或神经网络的办法剔除噪音。其二，声发射信号频率更高，这就要求传感器要有较高的谐振频率，即传感器具有较宽的放大倍数/频率平坦段，以保证真实地记录声发射波形。

致射：本项工作得到了本院玉国进教授级 工及清华大学刘时风教授的大力支持。特此致谢！

参考文献（略）

作者: [霍臻](#), [陈翠梅](#), [汪道林](#)
作者单位: [武汉安全环保研究院, 武汉](#)

相似文献(1条)

1. 期刊论文 [霍臻](#), [陈翠梅](#), [王正义](#), [HUO Zhen](#), [CHEN Cui-mei](#), [WANG Zheng-yi](#) [边坡稳定性声发射监测](#) -工业安全与环保2007, 33(5)

工程建设中,常在自然山地上开切人工边坡,一旦滑坡将造成巨大损失.实践证明:声发射(AE)技术能有效捕捉滑坡的前兆,从而进行预报.岩体AE检测技术是岩质工程结构受力破坏的实时动态检测方法,具有测点监控范围大,实时提供信息等优点. AE信号参数与岩质工程结构受力产生破裂损伤或破坏紧密关联.某永久船闸边坡稳定性AE监测的实践表明,根据AE数据的变化及“突变”,对边坡岩体、稳定性及其发展趋势进行评价是有效的.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6058884.aspx

下载时间: 2010年5月27日