

文章编号: 1000-7598-(2007)12-2529-06

岩质边坡声发射特征及失稳预报判据研究

易 武^{1,2}, 孟召平¹

(1.中国矿业大学(北京校区) 北京 100083; 2.三峡大学 宜昌 443002)

摘 要: 在分析岩质边坡失稳过程中岩体力学性质和声发射产生的微观机理基础上, 通过岩石声发射试验和岩质边坡声发射监测实例, 研究了岩质边坡声发射特征, 提出了岩质边坡失稳破坏的基本力学分类及其声发射的监测预报方法和判据, 实现对岩质边坡失稳的预测预报。研究结果表明, 边坡破坏前存在一次或多次声发射高峰。应用 AE 技术可以确定边坡在变形过程中应力集中活跃区; 以抗滑力减小为主的岩质边坡, 其失稳预报判据为大事件率在 15 次/min 以上, 预报时间为几分钟至数小时。以下滑力增大为主的岩质边坡失稳的预报判据为大事件率在 26 次/min 以上, 破坏时间为第一次声发射峰值期后的 30~45 d。

关 键 词: 声发射技术; 岩质边坡; 失稳预报判据

中图分类号: TU 413.5

文献标识码: A

Study on acoustic emission feature of rock slope and its instability forecast criterion

YI Wu^{1,2}, MENG Zhao ping¹

(1.China University of Mining and Technology, Beijing 100083 China;

2.China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Based on the analysis of microcosmic mechanism which is caused by rock mass mechanical property and acoustic emission in the course of rock slope failure, and through rock Acoustic Emission trial and monitor example of rock slope Acoustic Emission, the acoustic emission features of rock slope are studied; and the basic mechanical classification of deformation and failure of rock slope and the monitoring-predicting methods and criterion of AE are put forward, and the forecasting of rock slope failure is implemented. The research result shows that one or more peak values of acoustic emission appear before the failure of rock slope; the application of AE technology can determine the stress concentration and active areas during the deformation of slide slope; for the rock slope with decreasing "sliding resistance force", the failure prediction criterion is that the AE major events rate is more than 15 times per minute and the forecast time is from several minutes to hours; for the rock slope with the increasing "sliding force", the AE major events rate is more than 26 times per minute and the failure will occur in 30 to 45 days after the first peak value of acoustic emission.

Key words: AE technology; rock slope; instability forecast criterion

1 引 言

材料或结构发生变形和破坏时快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射(Acoustic Emission, 简称 AE)^[1], 用仪器检测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号进行与材料或结构相关研究的技术称为声发射技术(即 AE 技术)^[2]。声发射技术的研究是以 Kaiser 20 世纪 50 年代初在德国所作的研究工作为标志。他最有意义的发现是材料形变声发射

的不可逆效应: 材料被重新加载期间, 在应力值达到上次加载最大应力之前不产生声发射信号^[3]。即当材料受到应力达到最大先期应力时, 才会有明显的声发射出现, 即 Kaiser 效应。

声发射技术在边坡稳定性监测方面的应用是从 20 世纪 30 年代末的硬岩矿山进行声波试验研究开始, 在利用 AE 技术预测边坡稳定性方面取得显著进展和成效。60 年代末 70 年代初美国矿山局

收稿日期: 2005-12-01

修改稿收到日期: 2006-03-31

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目 (No. 2004ABA072, 2005ABA036); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目 (No. 200247) 国家自然科学基金资助项目 (No. 40172059)。

作者简介: 易 武, 男, 1966 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事工程地质勘察, 岩崩滑坡地质灾害的预测预报研究与防治工作。

Paulsen 等开始利用 AE 技术研究过加州一个露天矿的边坡稳定性,成功地监测预报了露天矿边坡的破坏过程。在国内,近几年冶金部武汉安全环保研究院利用 AE 技术对长江三峡大坝一些关键部位的岩石活动情况进行监测,为三峡大坝的建设提供了重要依据^[4,5]。由于检测设备、环境条件、边坡岩体结构、性质等多方面的复杂原因,使 AE 技术的实际应用效果受到影响^[6-8]。本文从岩质边坡失稳过程中岩体力学性质和声发射产生的微观机理分析入手,通过岩石声发射试验和岩质边坡声发射监测实例,研究岩质边坡声发射特性,提出岩质边坡声发射监测预报方法和判据,实现对岩质边坡失稳的预测预报。

2 危岩体岩石声发射室内试验

依据岩体与岩样具有相似的力学破坏过程^[9],可以利用室内岩石声发射试验研究岩质边坡声发

射预报判据、进行边坡失稳预报,下面是长江三峡链子崖危岩体软弱岩层—炭质页岩声发射室内试验^[10,11]。

(1) 试验条件:天然状态炭质页岩试样 4 块,饱水状态下的炭质页岩试样 3 块,共 7 块,试块均加工成形状 10 cm×10 cm×10 cm 的标准块体。

(2) 试验仪器和设备:JQ—200 型剪切流变仪、千分表、YSZ—2 型声发射自动采集仪、声发射探头等。JQ—200 型剪切流变仪由中型剪切仪、加荷系统、油-气蓄能稳压器所组成。YSZ—2 型声发射仪能在计算机的控制下实现定时自动采集数据(本试验采样时间间隔为 1 min),仪器包括型主机、探头、计算机 3 部分,探头接收响应频率 100 HZ-110kHz。

(3) 试验加载方式:分级加载;压应力增加、剪应力恒定,循环荷载;加载直至岩块破坏。

(4) 试验成果与分析:图 1 为 4 块天然状态下炭质页岩岩块试样声发射-应变关系曲线。

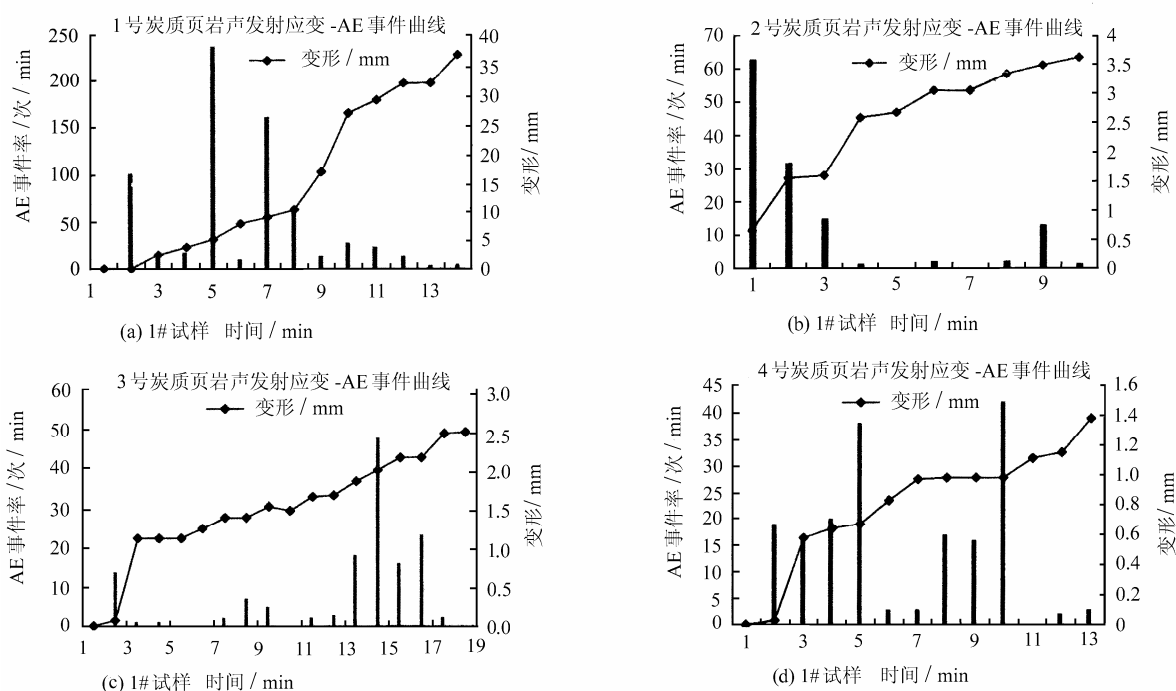


图 1 炭质页岩声发射-应变曲线

Fig.1 Relationship The AE-strain curves of carbonaceous shale

炭质页岩在饱水状态下,垂直、水平分别加载直至试样破坏,仍未接收到声发射信息,说明炭质页岩在饱水后已经完全软化。

炭质页岩试样声发射具以下特征:(1)各试块声发射率随应力的增加而增大,但当应力达到一定值时,声发射事件率达到最大值,随后声发射事件率一般随应力增加而减小,而变形仍持续增大,证

明炭质岩石存在“凯塞效应”。(2)岩石变形量与声发射参数大事件率没有明显的对应关系,出现较大变形或破坏时声发射反而不明显,但岩石破坏前一般有 1~2 次声发射事件率峰值,说明岩石声发射超前于位移,利用声发射监测岩质边坡进行超前预报是可行的。(3)炭质页岩破坏前声发射最大事件率为 8~62 次/min,个别岩块达 237 次/min。

上述室内岩石声发射试验与实际岩质边坡声发射监测结果显示两者有相似的声发射特征, 即岩石和岩质边坡失稳过程中的声发射水平与边坡位移变化常有下列现象: 高水平的声发射产生后常出现较显著的位移或破坏; 出现显著位移或临近破坏时, 声发射水平极低, 而高水平的声发射产生时, 位移变形上极小; 破坏前存在一次或多次声发射高峰^[7]。

依其应力平衡而言, 任何边坡的失稳都是由于受到各种内外因的作用引起其应力失衡, 即造成边坡失稳的力学实质是边坡下滑力与抗滑力相对消涨, 向临空方向作用力相对增大的结果。据此, 可将边坡按力学平衡破坏方式分为 3 类: 第 1 类是由于以下滑力的增大为主而引起边坡失稳, 即堆积加载或降雨等因素致使下滑动力增大而失稳的边坡。例如长江三峡新滩滑坡、甘肃省黄茨滑坡都是属推动式滑坡, 主要因为后缘加载作用引起的。第 2 类是由于以抗滑力减小为主而引起边坡失稳, 如边坡切脚或滑床软化降低摩擦系数等。如长江三峡链子崖危岩体由于长江下切, 形成高陡边坡, 岩体卸荷载裂形成拉裂缝, 另外多见于露天矿边坡、道路边坡切脚等, 破坏方式主要是崩塌、座滑, 渐次后退, 终止于岩土体休止角。第 3 类是下滑力增大, 同时抗滑力减小而引起边坡失稳, 这类边坡在土质滑坡中较常见, 往往为平移式滑坡。显然各类边坡失稳过程中的力学机制是不同的, 但都是由于边坡应力失去平衡而引起的。

从微观上分析, 边坡岩体存在的断层、裂隙、软弱夹层、复杂的地应力、地下水、物质成分差异等等使其力学性质十分复杂。岩体在外力作用下首先发生物理变形, 断层、裂隙、微节理被压缩和闭合, 随着应力的相对增加, 且大于结构面上的强度时, 岩体就产生沿一定结构面的剪切破坏, 从而使岩体破坏, 这与岩石的破坏具有相似的机制, 即一般有下列 4 个阶段^[10]: 压密阶段: 由于岩体存在着空隙和微裂缝, 它们受压后开始闭合, 故出现压力小而变形较大的非线性压密; 线弹性阶段: 岩体矿物颗粒受压缩变形, 岩体处于弹性变形状态, 应力-应变基本上呈线性关系; 裂缝开始和稳定扩张阶段: 岩体在一定的压力下产生裂缝, 裂缝在受力情况下稳定扩张, 伴有大量声发射。在此阶段内, 矿物颗粒的压密变形和裂缝的稳定扩张同时起作用, 但应力-应变关系仍呈线性; 裂缝急剧扩张阶段: 当压缩应力达到能量临界释放值时, 岩体试件开始产生积极膨胀, 此时岩体的剪胀机制占支配作用, 裂

缝急剧扩张, 接着便迅速崩溃。

简言之, 岩质边坡是由于在应力集中处如滑床、坡面等结构面上应力失去平衡, 克服结构面岩体晶粒凝聚力的应变能而产生大幅度的声发射^[5], 且随着应力增加而增加, 当应力达到极限即应力克服了凝聚力后产生位移时, 贮存的能量释放, 声发射活动及信号幅度急剧降低, 边坡在失稳前存在声发射平静期也是必然的。

对于前述以下滑力增大为主的岩质边坡失稳, 应力克服滑带等结构面物质凝聚力后还要克服环境其他“凝聚力”, 如前缘物质的支撑力等。因而, 第一次声发射峰值后, 又有一次因位移而形成的应变能量聚积, 克服这些“凝聚力”, 将形成了新一次声发射峰值, 显然这次声发射水平低于第一次。如些类推, 直到各种凝聚力松弛、破坏, 边坡才失去平衡而破坏, 即岩质边坡破坏前存在一次或多次声发射高峰。

3 危岩体声发射监测案例分析

3.1 链子崖 T8~T12 段危岩体声发射监测

链子崖 T8~T12 缝段危岩体是长江三峡库区近坝段最大的危岩体, 具二元结构, 上部为二迭系灰岩夹多层炭质页岩组成的近百米高陡崖, 底为二迭系马鞍山煤系地层采空区, 地表被多条平行临空面的裂缝切割, 体积约 $250 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。危岩体因长江下切及底部人工采煤作用减少了岩体支撑力, 恶化了边坡的稳定条件, 加速了裂缝扩张和岩体的形变, 总的来说边坡以卸荷崩塌、以崩促滑、剪切为主的方式破坏, 炭质页岩是对链子崖危岩体变形起控制作用的软弱岩层。

在野外, 岩质边坡常用的声发射监测仪为多通道、自动检测记录仪。一般采用的参数为能率(单位时间内声发射释放能量的相对累计值)、事件率(亦称总事件频度, 单位时间内的声发射事件次数、次/min)、大事件率。探头接收响应频率 100 HZ~110 KHZ。

1990~1992 年链子崖危岩体防治工程可行性研究阶段新增了 T8~T12 缝段声发射监测方法, 据危岩体的结构力学特点, 在岩体上、下部共布设监测孔 54 个, 孔深 2 m。使用仪器主要采用 YSZ-2 型 16 通道声发射仪自动定期巡回监测^[12]。

经过两年的监测表明, 危岩体声发射水平低, 大事件率大多低于 2 次/分, 岩体整体仍属稳定; 但是也存在一些相对较活跃的区域, 如前沿“五万方”危岩体, 雷劈石滑坡体后缘 T8~0 裂缝, T10 缝区

近陡崖上、下部,大事件率在 5—8 次/min。显然,与这些区段岩体处于临空卸荷拉张作用是一致的,故为监测、整治的重点。1993~1999 年对该段危岩体进行了工程治理,2000~2004 年防治工程效果监测显示危岩体稳定。

3.2 黄茨大滑坡声发射监测

1995 年 1 月 30 日位于兰州市西 70 km 黄河右岸的黄茨滑坡体,前缘东西宽为 300 m,后缘东西宽近 500 m,南北长为 370 m,发生了体积约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的整体滑动。由于预报成功(较预报时间提前 21.5 h),滑坡区 60 余户居民绝大部分已搬迁,故没有造成人员伤亡,虽然“这是第一例依据位移态数据准确做出的临滑预报”^[13],但在其监测系统中声发射监测的作用是不可忽视的。

黄茨滑坡体具二元结构,上部为黄土层和卵石层,总厚达 50.25 m,下部为白垩系暗红色泥岩夹泥质砂岩,且白垩系地层以 $10^\circ \sim 150^\circ$ 角倾向临空方向,滑坡即连同上覆黄土层沿白垩系地层中泥岩层面产生顺层滑动,滑坡动因主要是由于黄土层中的大量冬灌,增加了滑体后部自重,同时后侧灌区黄土下沉压缩时会产生一定的侧向推力和地下水入渗软化滑动带降低抗滑力,总的来说黄茨滑坡是“推动式的”岩质滑坡。

滑前的 1994 年 12 月初出于试验目的在滑体西部 1, 2, 3 号钻孔中安装了 5 个声发射探头,其中 S3 位于 1[#]钻孔 28.5 m 深处,滑面位置深 42 m; S4 位于 2[#]钻孔底 46.5 m 处,接近下覆滑面。两钻孔相距约 150 m,分别测到一段完整的曲线,为对比分析,分别选取与其邻近位移测点 C7、C8 时间-位移曲线进行比较,详见图 2、3。

监测结果显示:(1)两测点均接收到两期高水平的声发射。S4: 1994 年 12 月 7 日~15 日和 195 年 1 月 24~26 日,声发射大事件率分别为 142~620 次/min 和 12~288 次/min,对应位移变化是:从 12 月中、下旬开始加速变形,12 月底至 1 月上旬位移出现明显减速,1 月下旬又出现加速直到整体滑动。S3 测点距滑带 13 m,较 S4 测点距滑带远,但 S3 仍有两期较高水平的声发射:1994 年 12 月 29~31 日和 1995 年 1 月 16~25 日,声发射大事件率分别为 128 次/min 和 3~122 次/min,对应位移变化是:1994 年 12 月下旬至 1995 年 1 月上旬呈减速,1 月下旬始加速,直到边坡破坏。

(2)两处声发射监测资料均显示第一次声发射水平比第二次高,证明岩石凯塞效应在边坡岩体中同样存在。

(3)两处声发射监测均显示滑前有一个声发射平静期。

(4)利用声发射第 1 次峰值,以 30~45 d 为时间预报值。以 S4 第一次峰值作出时间预报应为 1995 年 1 月 7 日~30 日将发生整体滑动,按 S3 第 1 次峰值作出时间预报,滑动应为 1995 年 1 月 29 日~2 月 15 日。综合预报滑坡时间为 1995 年 1 月 29 日~30 日之间,而实际滑坡时间为 1995 年 1 月 30 日凌晨 2.5 h。

另外可以注意到 1995 年 1 月 24 日~25 日两处声发射频次由不同步趋近同步,预示滑坡体整体应力正在松弛,边坡即将破坏。

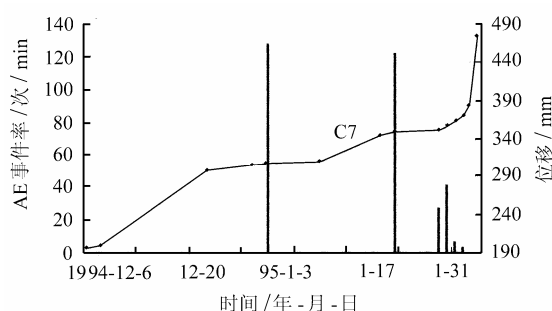


图 2 S3 点 AE-位移关系图 [11]

Fig.2 Relationship between the AE-displacement at the S3 point

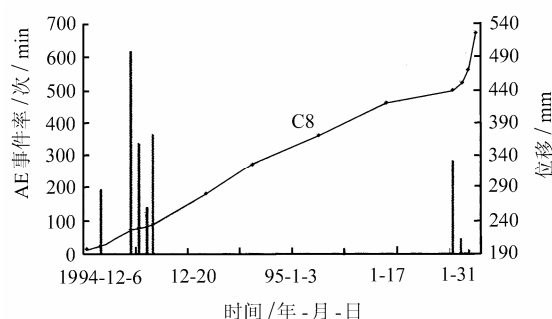


图 3 S4 点 AE-位移关系图 [11]

Fig.3 Relationship between the AE-displacement at the S4 point

4 岩质边坡声发射预报判据

依据上述试验及野外实际监测结果,长江三峡链子崖危岩体炭质页岩室内试验岩石破坏时声发射大事件率为 8~62 次/min,这与黄茨大滑坡大滑前声发射大事件声发射率为 12~620 次/min 相差较大;分析认为,主要有以下几方面的原因:(1)边坡岩体结构复杂,存在裂隙等结构面,岩石试样并不能代表整个岩体;(2)试验并不能完全模拟实际边坡复杂的应力环境等情况;(3)一小块试样破坏时的声发射源远远少于整个破坏岩体的声发射源,在量级上相差甚远。所以从室内岩石力学-声学

试验确定边坡破坏时的声发射判据, 只能作为参考。

据有关文献: 李典文在预报矿山岩质顶板冒顶时采用每分钟事件数在 20~30 次作为判据^[1]; Chichibu 等人在日本监测自然边坡时, 发生显著位移前 2 个月内有数次声发射峰值, 平均声发射率每分钟达 26~39 次。由于各类岩质边坡的地质条件不同, 判据标准亦不同, 笔者认为, 声发射判据一方面应与边坡力学类型有关, 同一岩性的岩体受拉与受压其声发射水平是不同的; 另一方面与控制边坡破坏并产生声发射源的地质体所处的环境状态有关。分析认为, 对于以“下滑力”增大为主引起失稳的岩质边坡声发射大事件率达到 26 次/min 以上可以进行预报; 对于以“抗滑力”减少为主的岩质边坡预报判据为大事件数在 15 次/min 以上较为合适。

预报时间上, 以“抗滑力”减少为主的岩质边坡的失稳, 往往集中于坡面、坡趾处不利结构面上, 由于受高陡临空面的影响, 岩体内出现微裂纹产生大量的声发射计数到边坡破坏的时间较短, 多为几分钟至数小时不等。

前已述及, 以增加“下滑力”为主引起失稳的岩质边坡, 一般都受到较复杂条件的约束, 所以这类边坡破坏前声发射计数常出现 2 个或 2 个以上高峰期, 且第一次高峰期峰值常比其他高峰期峰值大, 据统计分析第一次声发射高峰期至边坡破坏时的时间为 30~45 d, 每次高峰期后必然会产生位移加速变形, 据此可超前位移预报。

5 结 论

(1) 声发射监测适用于声发射源材料为岩石的岩质边坡。

(2) 岩质边坡失稳过程中, 声发射水平与边坡位移变化常有下列现象: 高水平的声发射产生后常出现较显著的位移或破坏, 即声发射活动超前于位移, 边坡破坏前存在一次或多次声发射高峰。这是由于在应力集中处如滑床、坡面等结构面上应力失去平衡, 克服结构面岩体晶粒凝聚力的应变能会产生大幅度的声发射, 且随着应力增加而增加, 当应力达到极限, 即应力克服了凝聚力后松弛产生位移时, 贮存的能量释放, 声发射活动及信号幅度急剧降低。证明岩质边坡失稳过程中存在凯塞 (Kaiser) 效应。

(3) 室内岩石声发射试验和野外声发射监测资料取得的声发射事件-位移关系, 表明岩质边坡与岩

石具有相似的变形破坏机制, 但由于岩质边坡的复杂性, 室内声发射判据参数只能作为岩质边坡破坏预报的参考,

(4) 在岩质边坡的长期监测中, 应用 AE 技术可以确定边坡在变形过程中应力集中活跃区, 为采用其他监测方法和边坡治理提供依据。应用声发射监测岩质边坡亦可作为短期预报, 其声发射判据参数为: 以“抗滑力”减小为主的岩质边坡破坏, 其预报判据为大事件率在 15 次/min 以上, 预报时间为几分钟至数小时; 以“下滑力”增大为主的岩质边坡破坏的预报判据为大事件率在 26 次/min 以上, 破坏时间为第一次声发射峰值期后的 30~45 d。特别是边坡出现多个声发射监测点大事件率峰值由不同步趋于同步时, 显示边坡变形已由局部扩展到整体, 这在利用声发射超前预报岩质边坡破坏更具重要意义。

参 考 文 献

- [1] 李典文. 利用声发射技术预报岩体破坏的若干问题[A]. 岩体(石)声发射文集汇编[C]. 武汉: 冶金部安全环保研究院, 1990.1-7.
- [2] 马孝春. 岩石切削中的声发射研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 77-83.
MA Xiao-chun; Zhang Dalun. Acoustic emission studies on rock cutting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1996, 15(1): 77-83.
- [3] 秦四清. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [4] 李俊平, 周创兵. 岩体的声发射特征试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 374-378.
LI Jun-ping, ZHOU Chuang-bing. Experimental research on acoustic emission characteristics of rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 374-378.
- [5] 耿荣生. 声发射技术发展现状—学会成立 20 周年回顾[J]. 无损检测, 1998, 20(6): 151-154.
GENG Rong-sheng. Recent Development of Acoustic Emission: Twenty-year Review of Chinese Society For Ndt [J]. *Nondestructive Testing*, 1998, 20(6): 151-154.
- [6] 万志军, 周楚良, 马文顶, 等. 边坡稳定声发射监测的实验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(增): 627-629.
WAN Zhi-jun, ZHOU Chu-liang, MA Wen-ding. Experimental study on acoustic emission monitoring of slope's Stability [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24 (Supp): 627-629.
- [7] Butt S D, Mukherjee C, lebanns G. Evaluation of acoustic