

梁天成、葛洪魁、郭志伟等, 2012, 利用声发射和波速变化判定岩石损伤状态, 中国地震, 28 (2), 154 ~ 166。

利用声发射和波速变化判定岩石损伤状态

梁天成¹⁾ 葛洪魁²⁾ 郭志伟¹⁾ 宋丽莉¹⁾ 张金伟¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

2) 中国石油大学(北京)非常规天然气研究院, 北京 102249

摘要 对岩石受单轴压缩损伤过程中的声发射和超声波波速进行了同步测量, 对比分析了声发射和波速随损伤过程的变化规律。研究表明, 岩石损伤过程可分成几个阶段, 不同阶段声发射和声波波速变化呈现不同特征; 利用超声波波速的相对变化能够稳定可靠地鉴别岩石的“加载强化”与“加载弱化”; 声发射 b 值对裂隙的非稳定扩展更加敏感, 可以作为岩石失稳预警参数; 岩石声发射和波速都对损伤具有记忆性, 重复加载下的声发射和超声波波速变化可提供更丰富的岩石损伤状态信息。

关键词: 岩石损伤 声发射 超声波速 重复加载 实验研究

[文章编号] 1001-4683 (2012) 02-0154-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

工程安全已成为关系人民生命财产安全的重大问题, 煤矿、隧道、矿山、水库等岩体失稳是由于应力作用下岩体内部损伤演化引起的。了解岩石损伤演化的机理与过程, 进行损伤状态判定、损伤程度评价和失稳预警对于减轻岩石工程灾害具有非常重要的意义。应力作用下, 岩石等脆性材料的微破裂或者裂隙会生长、发展、直至破坏, 广义而言, 这些现象均可称之为损伤。伴随岩石损伤过程, 将发生岩石物理性质的变化, 依据这些变化, 可以进行岩石损伤评价。

许多方法可以用于岩石损伤检测, 如电阻率、电磁、X 射线、CT 等 (IAEA, 2002), 其中基于弹性波的主动方法 (超声波) 和被动方法 (声发射) 具有简便、易于推广的优点。超声波方法是通过主动发射弹性波, 使其穿过岩石传播, 利用穿过岩石介质的波速及其衰减程度检测材料损伤, 再根据超声波速与弹性模量和强度的经验关系式来评价损伤。声发射是伴随着材料内部微裂隙的产生而激发的弹性波 (ASTM Internatinal, 2003), 它直接与岩石内部微破裂动态有关。

伴随着材料内部微裂隙的发展, 岩石弹性模量降低, 波速降低, 衰减增大, 该特征已被广泛应用于材料无损检测。许多学者 (陈颀, 1980; 杨宏峰等, 2004; 郑贵平等, 2009) 在利用弹

[收稿日期] 2012-05-14

[项目类别] 国家自然科学基金项目 (41174040) 资助

[作者简介] 梁天成, 男, 1987 年生, 在读硕士研究生, 主要从事岩石力学及声发射实验研究。

E-mail: liangtiancheng1987@163.com

性波波速检测岩石性质变化方面开展了大量工作。由于岩石为强衰减材料,在将弹性波波速用于检测岩石损伤演化时的主要困难是基于弹性脉冲初至的弹性波波速检测精度受到限制。Gret 等(2006)、宋丽莉等(2012)利用弹性波在岩石中的多次散射波,通过尾波波形干涉测量的方法大大提高了弹性波波速变化的检测精度。

研究者在利用声发射进行材料损伤评价方面也开展了很多工作。陈颢(1980)在国内较早地开展了岩石声发射特征室内实验研究。Lockner(1993)在实验室对脆性岩石在单轴应力下的声发射规律进行了研究,发现声发射速率与岩石非弹性应变密切相关,并发现了岩石损伤由弥散性微破裂逐渐汇聚-局部化(破裂成核)的发展过程。声发射的一个重要参数是 b 值,它引自天然地震震级和频度之间的关系(Gutenberg et al, 1954),代表大小震级事件的分布情况。室内研究工作(Mogi, 1962; Scholz, 1968; 耿乃光, 1986; 刘建新, 2002; 刘力强等, 2001)表明, b 值主要决定于材料的非均质性和应力状况。Sammonds 等(1994)得到了 b 值随时间的变化趋势,发现在早期破坏阶段 b 值较高,而在破裂前 b 值降低。Lei(2006)利用声发射研究了脆性岩石破坏前的损伤,得出损伤过程可分为早期(primary)、中间(secondary)和成核(nucleation)等 3 个阶段。早期阶段反映预存微裂隙的活动,其随着应力增加以声发射事件速率和 b 值的增加为特征;中间阶段包括微裂隙汇聚和亚临界扩展,随着应力增加以声发射事件速率和 b 值的快速降低为特征;成核阶段代表着宏观破裂面的出现和加速扩展,该阶段 b 降低至 0.5 左右的最低值。每个阶段的 b 值随时间的变化与岩石样品的颗粒大小密切相关,粗颗粒样品的 b 值较低。

在利用声发射进行岩石类损伤评价方面,有关混凝土的研究相对较多。主要研究内容是单轴应力下声发射的规律以及声发射累计数与累积损伤的关系。Ohtsu(1987)及 Dai 等(1997)先后提出了声发射事件数及其随应力变化的经验关系式。与单调加载相比,重复加载经历了多次加载和卸载,岩石内部的微裂隙也经历了多次闭合和张开等过程,波速和声发射事件也发生相应的变化,此条件下的弹性波波速和声发射蕴含了更丰富的岩石损伤的信息。其中岩心重复加载时声发射对于应力记忆的 Kaiser 效应已被用于岩心应力测量(Kanagawa et al, 1976)。后期的研究表明,在岩石发生一定的损伤后, Kaiser 效应点将先于先期应力出现,即所谓的 Felicity 效应(Fowler, 1986)。以往的大多数研究均将声发射和声波波速分开进行,而本文采用主动方法与被动方法相结合的方式,对单轴单调加载与重复加载下岩石声发射和声波波速变化进行了同步对比监测,并用于评价岩石损伤变化过程。

1 实验过程

1.1 材料和样品制备

实验中共选用 3 种岩样 9 块岩石(表 1),其中浅灰色中粒花岗闪长岩、灰色细粒花岗闪长岩、大理岩等各 3 块(图 1)。试件形状为圆柱形。实验岩样按照国际岩石力学实验的建议方法进行加工,利用平行度测试仪测量,垂直度偏差小于 0.001 弧度,平行度偏差小于 0.15mm。在岩样表面探头位置处用细砂纸打磨,以保证探头与岩样的平整光滑接触。

1.2 实验系统

本次实验的监测设备主要分为 3 大部分,即加载系统、声发射监测系统、声波波速测量系统(图 2)。

表 1 岩样基本参数

岩性	编号	长度(mm)	直径(mm)	平行度(mm)	纵波波速(m/s)	单轴抗压强度(MPa)
浅灰色中粒花岗岩 闪长岩	1_1	110.78	48.95	0.10	4799.02	98.48005
	1_2	110.46	48.89	0.04	4769.76	
	1_3	110.32	48.64	0.06	4775.82	
灰色细粒花岗岩 闪长岩	2_1	110.74	48.52	0.15	5002.06	130.13
	2_2	110.61	47.82	0.03	4387.16	
	2_3	110.64	48.41	0.04	4556.48	
大理岩	3_1	109.93	48.7	0.02	6283.87	170.4379
	3_2	110.14	48.15	0.02	6212.90	
	3_3	110.04	48.43	0.05	6325.75	

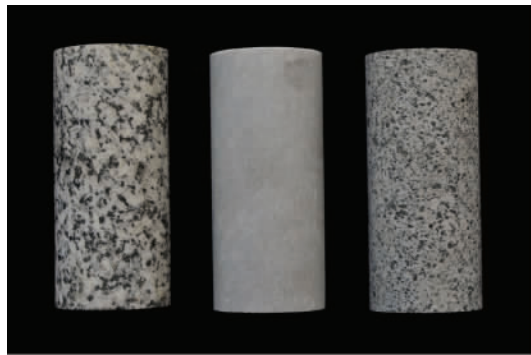


图 1 浅灰色中粒花岗岩闪长岩、大理岩和灰色细粒花岗岩闪长岩岩样

1.2.1 加载系统

主要由 MTS 电液伺服加载系统构成。MTS 压机的最大载荷为 1000kN，加载系统由计算机自动控制加载速率，自动读取载荷及位移数据并保存到计算机中。同时在岩石样品上粘贴应变片，以便测试加载过程中岩石的变形。

1.2.2 声发射系统

采用 PAC-II (美国物理声学公司) 声发射系统。该系统具有 32 个通道, 可对 1K ~ 3MHz 频率范围的连续波形信号进行采集, 可采集 20 多个特征参数, 包括声发射事件数、振幅、能量、上升时间等。40MHz、18 位 A/D 转换器记录数据, 可进行实时分析和进一步的信号处理, 并可实时记录波形流。用 4 个 Nano 探头接收声发射信号, Nano 探头的带宽是 50 ~ 750KHz, 探头尺寸为 $\phi 8\text{mm} \times 8\text{mm}$, 4 个探头分别连接 4 个通用的 2/4/6 型号的前置放大器, 记录信号被放大 40dB 后输入到声发射监测系统, 声发射参数和波形都被声发射系统实时记录。用特种硅胶脂做耦合剂, 再用松紧带把探头牢牢地固定在岩样表面, 探头放置位置如图 2 所示。

1.2.3 声波波速测量系统

岩石波速测量实验系统主要由脉冲发射器、发射和接收两个换能器、数据采集器等组成。脉冲发生器为 Olympus 公司的 5058PR 型高电压脉冲发生器, 本次实验发射 400V 的激励脉冲; 发射与接收换能器都是 Nano 探头; 数据采集系统为 NI 高速数据采集器, 采样率设

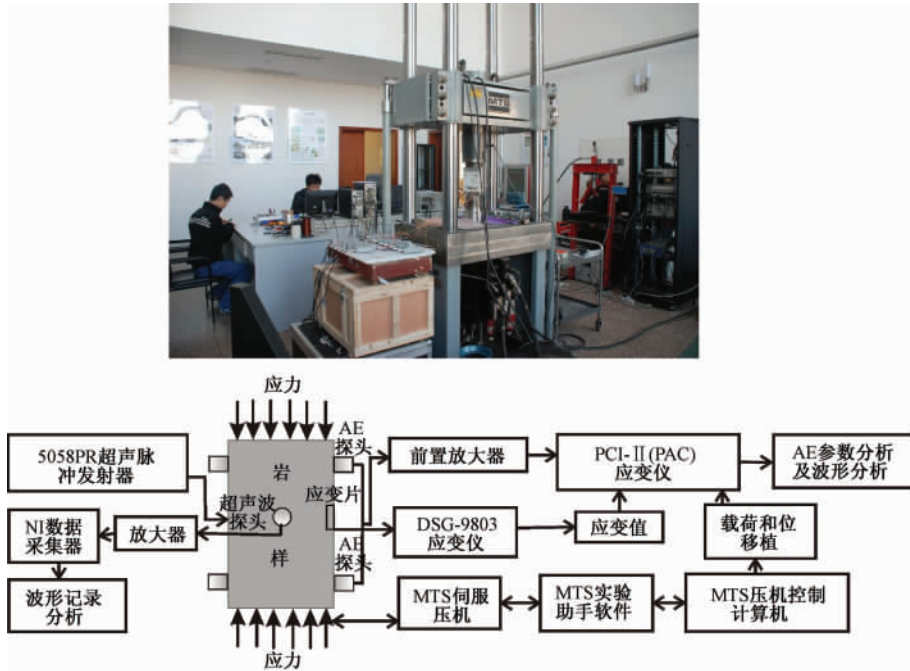


图 2 岩石实验测试系统示意图

定为 20MHz, 单个数据信号记录长度为 5kB。

1.3 实验过程

本次试验主要监测岩石损伤过程中的声发射参数和声波波速变化。实验中每一种岩性的 3 块样品中的一块采用单调加载模式, 另外两块采用重复加载模式, 加载系统采用载荷控制, 加/卸载速率均为 0.3kN/s, 实验全过程都监测声发射, 载荷以每变化 5kN (应力约 2.5MPa) 保持数秒的阶步, 进行超声测试, 实验加载方案见图 3。先进行单轴单调加载实验, 以测量岩石的抗压强度, 再进行 6 个周期的重复加载实验, 并用测量的抗压强度的

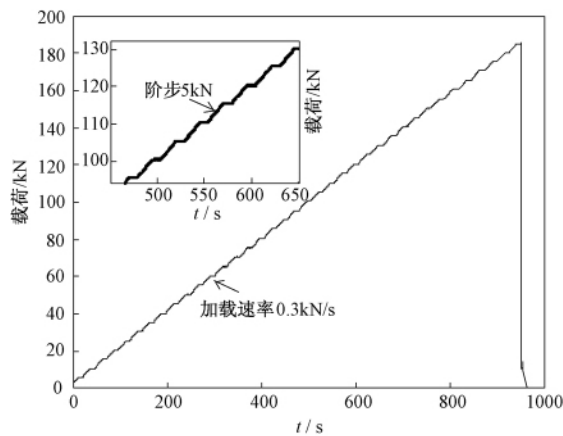


图 3 实验加载方案

15%、30%、45%、60%、75%和90%分别作为每一加/卸载周期的最大应力值。同时在每块岩石样品上粘贴两对应变片,测量加载过程中岩石的变形。实验中声发射设备前置放大器设定为40 dB,采样频率设定为1MHz,其阈值设定为40dB,峰值鉴别时间(Peak Definition Time, PDT)为100 μ s、撞击鉴别时间(Hit Definition Time, HDT)为200 μ s、撞击闭锁时间(Hit Lockout Time, HLT)为300 μ s。实验中,薄层的硅胶脂作为岩样和传感器之间的耦合剂,再用两个松紧带紧紧地把传感器固定住,以保证传感器和岩石之间的耦合。为消除压机压头与岩石样品摩擦对声发射事件的影响,减少端部效应,在岩样两端垫上聚四氟乙烯薄片。用声发射系统自带的传感器自动检测功能对所有传感器进行了校正检查。

2 单调加载实验结果

2.1 声发射参数随应力的变化

幅度是指声发射事件信号波形的最大振幅值,是表征信号强弱的参数,其大小与微破裂激发能量的大小有关。声发射探头所探测到的声发射信号数量称为事件数,常用于评价声发射活动性。图4是各个通道收集到的声发射累积事件数随时间的变化以及声发射事件最大振幅随时间的变化。

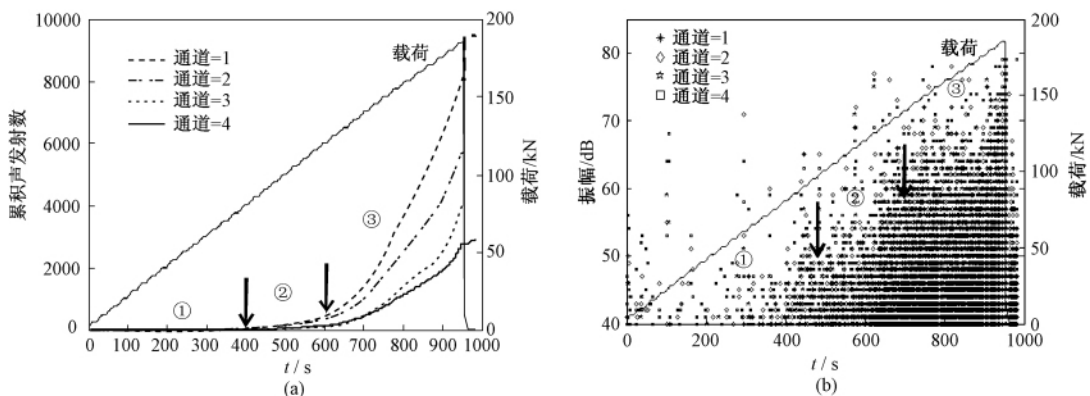


图4 (a) 浅灰色中粒花岗岩闪长岩单调载荷实验累积声发射事件数和载荷与时间的关系;
(b) 声发射事件最大振幅和载荷与时间的关系

根据岩石声发射事件的最大振幅和累积事件数,岩石在单调受压时的声发射过程表现出3个特征阶段(图4),即:①微破裂闭合和弹性变形阶段。该阶段大约在极限强度的0%~43%范围内(图4中0~400s)。该阶段声发射事件相对较少,信号幅值较低,对应着原有空隙、裂隙的压实闭合。②微裂隙稳定扩展阶段。该阶段大约在破坏荷载的43%~65%(图4中400~620s),声发射事件数、声发射信号的幅值等都随着荷载的增加而增加,但增加的速率缓慢,累积声发射事件曲线逐渐偏离了线性关系。可以认为,在该阶段中,微裂纹的稳定扩展是声发射产生的主要原因。此阶段后期有一很明显的拐点。③裂隙非稳定扩展阶段。当荷载超过破坏荷载的70%时(图4中620~950s),声发射事件数量和幅度急剧增加,大量新裂纹形成、扩展、合并、破裂成核并最终导致宏观破坏。

2.2 声发射 b 值随应力的变化

Gutenberg等(1942)在研究全球地震活动性时,定义了地震震级和频度的统计关系式,

地震频度的对数与震级之间存在如下线性关系

$$\log N = a - bM, \quad \text{其中 } M = \log A \tag{1}$$

式中 M 为震级; N 是震级大于等于 M 的累积地震数; a 和 b 是正的常数, a 代表地震活动性, 主要取决于序列中的最大地震震级; b 为直线斜率, 通常是一个接近于 1 的数, 反映大小地震之间的比例关系。式(1)也可用于研究声发射事件的振幅和频度之间的关系。在声发射中, 震级由振幅表示, Gutenberg-Richter 公式可修改为

$$\log_{10}(N) = a - b \frac{A_{\text{dB}}}{20}, \quad \text{其中 } A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} A_{\text{max}}^2 = 20 \log_{10} A_{\text{max}} \tag{2}$$

式中 A_{dB} 是以分贝表示的声发射事件最大振幅; A_{max} 是以微伏表示的声发射事件最大振幅 (Colombo et al, 2003)。由于设定的门槛是 40dB, 振幅范围为 40 ~ 100dB, 步长 1dB, 所以在计算过程中 $\Delta A_{\text{dB}} = 1$ 。

针对单调加载实验, 采用两种统计方法求取 b 值, 即离散频度方法和累积频度方法。用离散频度方法求取 b 值时利用等事件数量窗进行分析, 为了增加 b 值计算的稳定性, 用滑动平均窗方法, 取 250 个声发射事件作为一组数据, 并以 50 个事件滑动进行取样计算。用累积频度方法求取 b 值时利用不等事件数量窗进行分析, 增量为 200 个事件, 即 1 ~ 200, 1 ~ 400..., 得到 b 值随应力的变化规律。

比较离散频度(图 5(a)、图 6(a))和累积频度(图 5(b)、图 6(b))两种统计分析结果可见, 其趋势大致相同。离散频度法求取的 b 值的统计区间比较小, 更能反映 b 值局部变化的细节; 累积频度法求取的 b 值是对声发射历史事件的统计, b 值变化更平滑, 更能反映 b 值的长期趋势。

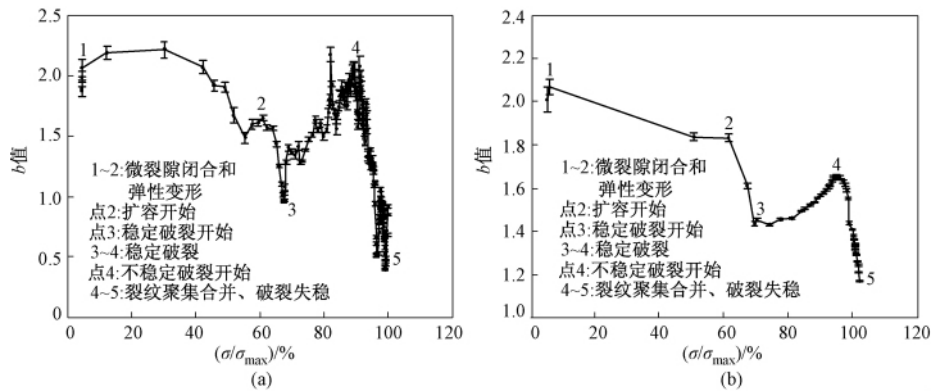


图 5 (a) 灰色细粒花岗岩闪长岩单调载荷实验声发射离散频度方法求取的 b 值随应力的变化曲线; (b) 声发射累积频度方法求取的 b 值随应力的变化曲线

图 5、6 为灰色细粒花岗岩闪长岩、大理岩在单调加载时 b 值随应力的变化曲线。结果显示, b 值的变化趋势和岩石损伤过程有很好的对应关系 (Rao et al, 2005)。由图 5 可见 1 ~ 2、3 ~ 4、4 ~ 5 等 3 个不同的阶段, 由图 6 可见 1 ~ 2、3 ~ 4 等 2 个不同的阶段。在加载的早期阶段(阶段 1 ~ 2), 声发射主要因为岩石先存的微破裂摩擦和闭合而产生, 显示高 b 值, 约等于 2.1, 然后减少到 1.8。点 2 处, 扩容(非弹性的体应变)的开始归因于大量新的微破裂的形成, 是一很大的跳跃点, 大约发生在破裂强度的 60% 左右, b 值明显下降。随着载荷的进

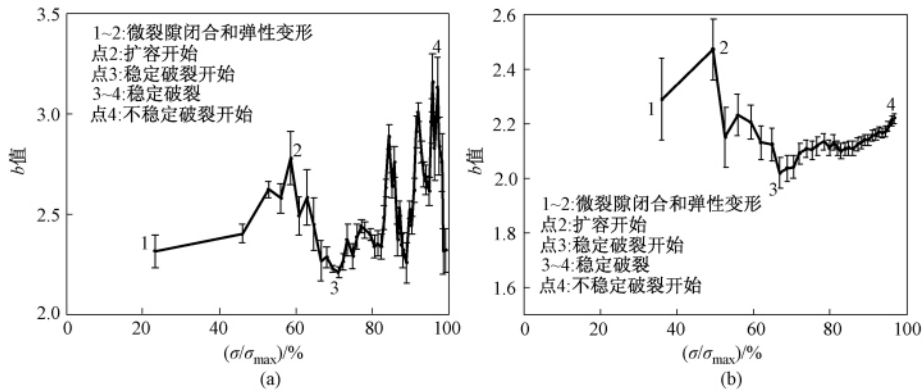


图6 (a) 大理岩单调载荷实验声发射离散频度方法求取的 b 值随应力的变化曲线;
(b) 声发射累积频度方法求取的 b 值随应力的变化曲线

一步增加, b 值平稳, 是由扩容(点2)到新的裂纹或者破裂的稳定发育阶段(阶段3~4), 相当于破裂强度的65%~94%。该阶段新形成裂隙的数量和声发射事件幅度都稳定地增大, 而细粒花岗闪长岩、大理岩 b 值有上升的趋势, 这与岩石的强度、微结构和岩性有关。随后是不稳定破裂的开始(点4), b 值开始迅速下降(阶段4~5), 直到岩样破坏, 这归因于裂缝合并和伴随的应力释放, 到最后阶段 b 值已经下降到1.2。但大理岩没有阶段4~5, 大理岩致密, b 值较高, 声发射数较少, 其声发射监测的预警能力不强。实际应用中, 特征点3、特征点4对于破坏预警监测是最有用的, 可以识别破坏的临界状态和预测岩石的整体破坏程度。

2.3 声波波速随应力的变化

在加载过程中, 同时进行了超声波波速测量。为提高信噪比, 提高直达波速检测精度, 经过100次叠加处理, 作为该压力下的波形数据。相邻两个压力点做互相关, 得到相邻压力点的波速相对变化量, 然后累积得到每个压力点相对初始5kN压力时的相对波速变化。

分别对3类岩石进行加载, 计算其超声波波速变化, 并给出应力-波速变化曲线, 结果如图7所示。横坐标表示最大载荷的百分数, 纵坐标表示不同应力作用下波速相对于荷载5kN时波速的变化量。由图7可以看出加载强化区(AB段)、加载弱化区(BC段)和加载失稳区(CD段)等3个不同的阶段。在加载强化区, 岩石声波波速随压力的增加而增大, 增速随压力的增加而减小, 在B处(相当于最大载荷40%)增速最小。这是由于岩石在加载初期时微裂隙在应力作用下不断闭合, 波速随压力的增加而增大。随后, 当载荷超过40%后, BC段波速随压力增加而减小, 而且速度变化率随压力的增加而增大, 此时, 随着应力的变大岩石内部开始出现少量的微裂隙, 导致波速减小。在C点, 当浅灰色中粒花岗闪长岩达到最大载荷80%时波速已经降至初始水平, 而灰色细粒花岗闪长岩到60%时就已经降至初始水平。随着载荷的进一步增加, 到了加载失稳区, 波速迅速减小, 且变化率急剧增加。

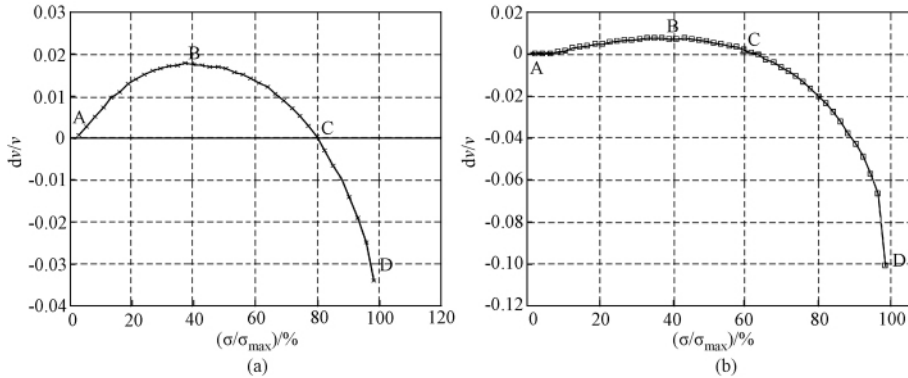


图7 单调载荷实验直达波波速随应力变化曲线
(a) 浅灰色中粒花岗闪长岩; (b) 灰色细粒花岗闪长岩

3 重复加载实验结果

3.1 声发射活动性随加载循环的变化

岩石重复加载过程中,声发射事件的振幅随载荷的增强而增大(图8(a))。在前4个周期中,只有载荷达到上次最大载荷后声发射才开始活动,即岩石 Kaiser 效应(Kaiser, 1953)。随后的第5个载荷周期中,岩石有轻微的损伤,还没达到上次最大载荷时就已经有声发射活动,即 Felicity 效应(Fowler, 1986)。循环加载中,不仅加载阶段有声发射活动,卸载阶段也开始有声发射活动,并且随着循环次数的增加,卸载阶段声发射活动性有较明显的增加(图8(b))。

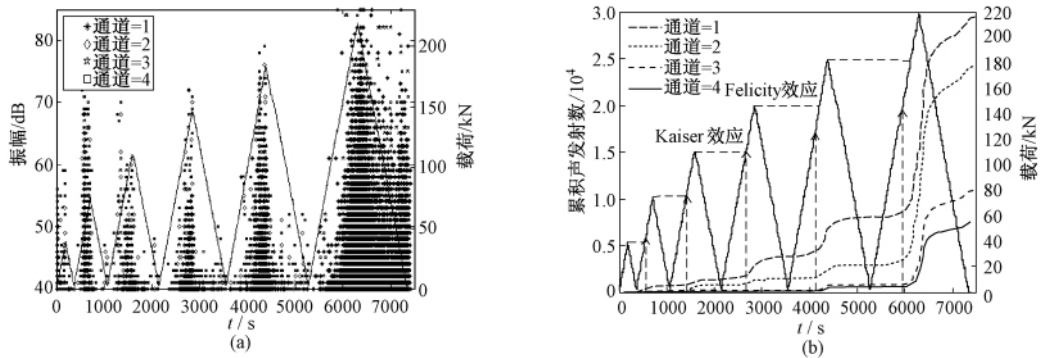


图8 (a) 灰色细粒花岗闪长岩循环载荷实验声发射事件最大振幅和载荷与时间的关系;
(b) 声发射事件数累积和载荷与时间的关系

3.2 利用加载循环声发射活动性指数定量评价损伤——载荷比(Load ratio)

载荷比(Load ratio)和平静比(Calm ratio)两个指标曾被用来定量评价混凝土损伤程度(The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2000)。在对岩石反复加载过程中,载荷比(Load ratio)的定义是:第*i*次加载所达到的荷载水平/第*i*+1次加载过程中恢复有效声发射时的荷载水平。

图9为浅灰色中粒花岗闪长岩和灰色细粒花岗闪长岩的载荷比值和累积声发射数随载

荷的变化曲线。由图 9 可见,载荷比值随循环次数的增加而逐渐减小。根据载荷作用下岩石损伤演化机理可知,经过几次反复加卸载,岩石的损伤随加载(循环次数)而增强,载荷比减少,表明岩样内部破坏随加卸载循环次数的增多不断累积,造成岩样声发射不可逆程度不断提高。载荷比的实质是对岩石的内部损伤程度的记忆。因此,载荷比大于 1 代表 Kaiser 效应仍然起主要作用,图 9(a) 清楚地显示了最大载荷的 60% 前是 Kaiser 效应起主要作用,载荷比 0.95 以下表示严重的损伤。

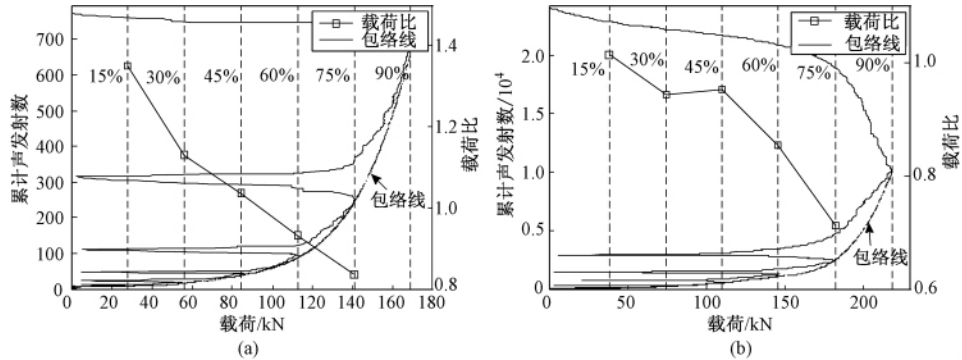


图 9 载荷比和累积声发射数与载荷的关系曲线

(a) 浅灰色中粒花岗闪长岩(通道 2); (b) 灰色细粒花岗闪长岩(通道 3)

重复加载条件下,累积声发射数包络线与单调加载对应的参数具有相类似的规律。与单调加载相比,重复加载经历了多次加载和卸载,岩石内部的微裂隙也经历了多次闭合、张开等过程,声发射事件也发生相应地变化,重复加载条件下的声发射蕴含了更丰富的岩石损伤的信息。

3.3 弹性波波速随加载循环的变化

图 10 表示岩样在循环加载时的波速变化。由图 10 可见,岩石的波速随着应力的增加而增大,并且波速不仅与应力的大小有关,也与加载、卸载过程有关。在应力较小时,浅灰色中粒花岗闪长岩在第 1 个循环周期、细粒花岗闪长岩在前 2 个循环周期时,卸载过程中的波速要比加载过程的波速大。而后几个循环周期中随着应力的增大,卸载过程中的波速要比加载过程的小。

在初期,重复加载波速的上升是由于初始加载引起原有裂隙闭合,卸载时这些裂隙没有完全张开,使波速高于初始加载值。而后续重复加载过程中,随着应力的增大在岩石内部产生新的裂纹,损伤程度加大;卸载时,部分裂纹随应力降低而张开,从而导致卸载过程中的波速要比加载过程的小,加卸载波速差异的程度与岩石的平均裂隙密度成正比。岩石波速都对损伤具有记忆性,所以重复加载时波速的变化可作为岩石损伤的评价手段。

在第 1 次加载过程中,波速与应力呈现良好的一致关系,这和岩石处于硬化阶段,裂隙不稳定,随应力变大而闭合,随应力减小而张开是吻合的。在第 2 次加载过程中,波速变化规律基本与第 1 次一致。但是由于应力变大,已经进入弹性阶段,波速变化渐显平稳。而从第 3 次加载开始,波速在加载初期有减小的现象。这可能是与岩石经过前两次的加载,内部产生次生裂隙,荷载又比较小有关。从第 6 次加载可以看出,波速初期的减小量已经很大。

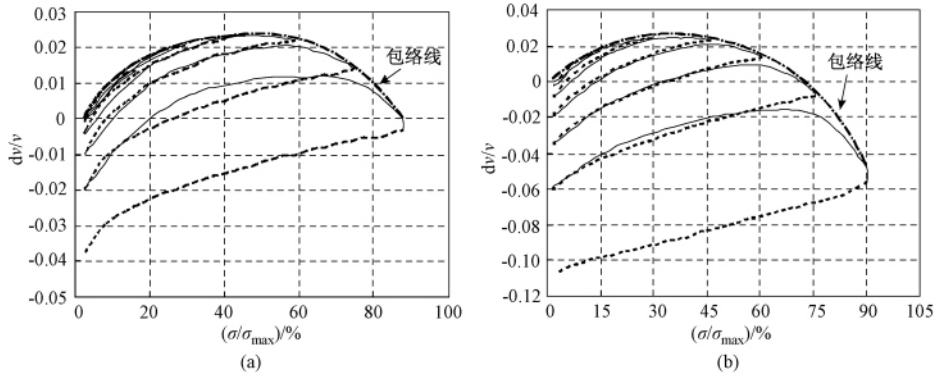


图 10 (a) 浅灰色花岗闪长岩(中粒)重复加载直达波波速随应力变化曲线;

(b) 细粒花岗闪长岩循环加载直达波波速随应力变化曲线

虚线表示卸载曲线,实线表示加载曲线。

说明岩石内部已经产生大量的微裂隙,很有可能在第 5 次加载后期已经进入膨胀阶段,第 6 次卸载时,岩石已经处于失稳状态,随应力变小波速快速减小。

重复加载条件下,声波波速的包络线与单调加载时具有相类似的规律。和累积声发射数包络线类似,重复加载条件下的弹性波波速也蕴含了更丰富的岩石损伤的信息。

4 岩石损伤状态判定

岩石损伤检测是岩石损伤力学研究的重要基础,也是岩石损伤理论应用于岩石工程时所需解决的关键技术之一。采用不同的测试技术时,必须考虑岩石真实损伤与相应测试的物理参数描述之间具有的相互对应关系,尽可能使得所测试的参数能真正反映损伤变量的值。不同测试方法的不同参数对岩石损伤的不同阶段具有不同的敏感性。

根据岩石损伤过程中不同检测技术不同参数的变化趋势,可以确定不同参数各个阶段的临界值和临界状态以及各个阶段岩石损伤的变化情况。前文我们对浅灰色中粒花岗闪长岩利用 3 种参数把损伤过程分成了几个阶段,即:声发射最大振幅和累积声发射数随载荷的变化、 b 值随载荷的变化、声波波速随载荷的变化。根据这 3 种参数的变化趋势,找出临界点,然后根据临界点位置进行分区。

根据随着应力的增加 3 种参数综合变化的情况,可将岩石状态分为 3 个区,即加载强化区、初始损伤区和严重损伤区,分别对应图 11 中的浅灰、灰和黑 3 个区。在加载强化区,岩石声波波速随着应力的增加而增加,裂缝不断闭合,岩石处于强化状态。由于该区域声发射数较少,导致声发射 b 值对该区域不敏感。到了初始损伤区,声波波速下降缓慢,累积声发射数缓慢增加,声发射 b 值稍有增加,在这种状态下,岩石仍然安全稳定。当岩石处于严重损伤区时,岩石内部已出现大量新的裂纹,累积声发射数呈指数增加,波速在 C 点(载荷比 80%)处开始迅速降低,而声发射 b 值保持稳定,并随着应力的增加,裂纹继续扩展,直至形成较大的破裂面, b 值大约在载荷比 95% 处有一明显跳跃,后迅速下降到最低值。处于该区域的岩石,状态极不稳定,岩石损伤严重。

在本研究中, b 值和超声波波速的变化趋势是与压力紧密相关的。如图 11(a) 所示, b

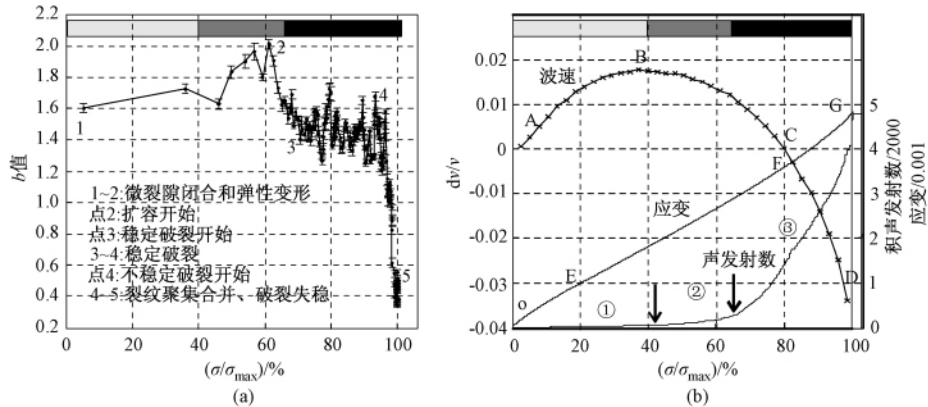


图 11 利用 3 种参数将浅灰色中粒花岗闪长岩损伤过程划分为不同区间的对比

(①~③含义同图 4, AB、BC、CD 含义同图 7)

值变化曲线能清楚地显示导致岩石动力学破坏的两个点：“扩容”点(点 3)以及“不稳定破裂”点(点 4)。这两个点对于监测岩石、岩体、混凝土结构的稳定性和完整性具有重要的意义。超声波波速相对变化能够稳定可靠地鉴别岩石的“加载强化”与“加载弱化”，可以作为岩石损伤评价参数之一，加载失稳区(C 点)能作为预警点(图 11(b))。

5 结论

通过建立的综合实验观测系统，对岩石同步进行了应力应变测量、声发射实验和声波波速测量，对实验数据处理分析后得到如下结论。

(1) 单轴单调和重复加载下声发射和超声波波速变化能够较好地反映岩石损伤的状态和程度。

(2) 根据单调加载下声发射和波速的变化，把岩石损伤过程分成了几个不同阶段，这种划分反映了岩石损伤的微观机理与过程。

(3) 利用超声波波速的相对变化能够稳定可靠地鉴别岩石的“加载强化”与“加载弱化”。

(4) b 值对裂隙的非稳定扩展更加敏感，可以作为岩石失稳预警参数。

(5) 岩石声发射和波速都对损伤具有记忆性，重复加载条件下声发射的载荷比和加卸载超声波速差可较好地定量表征岩石损伤程度。

参考文献

- 陈颢, 1980, 地壳岩石的力学性质——理论基础和实验方法, 281~314, 北京: 地震出版社。
 耿乃光, 1986, b 值模拟实验的进展和我国 b 值模拟实验的开端, 地震学报, 8(3), 330~333。
 刘建新, 2002, 岩石破裂声发射实验研究, 19~29, 北京: 中国地震局地球物理研究所(硕士论文)。
 刘力强、马胜利、马瑾等, 2001, 不同结构岩石标本声发射 b 值和频谱的时间扫描及其物理意义, 地震地质, 23(4), 581~587。
 宋丽莉、葛洪魁、郭志伟等, 2012, 利用多次散射波监测介质性质变化的实验研究, 岩石力学与工程学报, 31(4), 713~722。

- 杨宏峰、施行觉,2004,轴向压力下砂岩波速的实验研究,地球物理学进展,**19**(2),481~485。
- 郑贵平、赵兴东、刘建坡等,2009,岩石加载过程声波波速变化规律实验研究,东北大学学报(自然科学版),**30**(8),1197~1200。
- IAEA, 2002, Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency:26~32.
- ASTM International, 2003, ASTM E1316-04 standard terminology for nondestructive examinations, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
- Colombo I S, Main I G, Ford M C, 2003, Assessing damage of reinforced concrete beam using *b*-value analysis of acoustic emission signal, J Mat Civ Eng, **15**(3),280~286.
- Dai S T, Labuz J F, 1997, Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE,**9**(4),200~205.
- Fowler T J, 1986, Experience with acoustic emission monitoring of chemical process industry vessels, Progress in Acoustic Emission III, Japan Society for Non-destructive Inspection:150~162.
- Gret A, Snieder R, Scales J, 2006, Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry, J Geophys Res, **111**, B03305, doi: 10.1029/2004JB003354.
- Gutenberg B, Richter C F, 1954, In seismicity of the earth and associated phenomena, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA,2nd edn.
- Kaiser E J, 1953, A study of acoustic phenomena in tensile test. Munich, Germany: Technische Hochschule Munchen.
- Kanagawa T, Hayashi M, Nakas H, 1976, Estimation of spatial geostresses components in rock samples using the Kaiser effect of acoustic emission//Proceedings of the 3rd Acoustic Emission Symposium, [s. l.]: [s. n.]:229~248.
- Lei X L, 2006, Typical phases of pre-failure damage in granitic rocks under differential compression, Geological Society, London, Special Publications, **261**,11~29.
- Lockner D, 1993, The role of a coustic emission in the study of rock fracture, Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr,**30**(7),883~899.
- Mogi K, 1962, Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fracture of various materials and some related problems in earthquakes (2), Bull Earthq Res Inst, **40**(4),831~853.
- Ohtsu M, 1987, Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application, Acoustic Emission,**6**(2),99~108.
- Rao M V M S, Prasanna Lakshmi K J, 2005, Analysis of *b*-value and improved *b*-value of acoustic emissions accompanying rock fracture, Current Science, **89**(9),1577~1582.
- Sammonds P R, Meredith P G, Murrell S A F, 1994, Modelling the damage evolution in rock containing pore fluid by acoustic emission, Eurock 94, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Scholz C H, 1968, The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes, Bull Seism Soc Am, **58**(1),399~415.
- The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2000, Recommended practice for in situ monitoring of concrete structures by acoustic emission, NDIS 2421,24.

Evaluation of rock damage state with acoustic emission and velocity variation

*Liang Tiancheng*¹⁾ *Ge Hongkui*²⁾ *Guo Zhiwei*¹⁾ *Song Lili*¹⁾ *Zhang Jinwei*¹⁾

1) Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging (Institute of Geophysics), CEA, Beijing 100081, China

2) Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Rock damage and evolution is the basic reason for rock material failure; it is significant to determine the damage state for the security of the rock engineering. The rock will damage under external load, accompanied by a series of changes in physical and mechanical properties. By testing the changes, we can determine the damage state of rock and evaluate the damage degree. In this paper, we use uniaxial monotonous loading to detect the acoustic emission and ultrasonic wave velocity synchronously in the process of rock damage, and make comparative analysis on the variation law of acoustic emission and velocity with damage. It shows that rock damage process can be divided into several stages, and the acoustic emission and ultrasonic velocity variations exhibit different characteristics in different stages. The relative changes of ultrasonic velocity can be used to make stable and reliable identification of the rocks' "strengthening loading" and "weakening loading"; the b -value during acoustic emission is more sensitive to the non-stable expansion of the fractures and can be considered as a warning parameter of rocks' instability; both the acoustic emission and the velocity have a memory in rock damage, and the acoustic emission and velocity variation under cycle loading can provide richer information on rock damage. These results can be used to guide the quantitative evaluation for rock or concrete damage and safety evaluation in rock engineering.

Key words: Rock damage Acoustic emission Ultrasonic velocity Repeated loading
Experiment research