

DOI: 10.11779/CJGE201906011

岩石单轴压缩下损伤表征及演化规律对比研究

张国凯^{1,2}, 李海波², 王明洋^{1,3}, 李杰³, 邓树新¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
3. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 采用声波、声发射一体化装置同步测试单轴压缩下花岗岩应力应变、超声波及声发射(AE)特征演化规律, 分析岩石特征应力对应的宏-微观表征, 通过裂纹体积应变、声发射及声波特征等共同量化岩石损伤演化过程。结果表明: 裂纹体积应变和波速对应的损伤起始应力吻合较好, AE事件、幅值分布、 b 值对应的应力特征值基本一致, 但AE事件表征的损伤累积开始早于宏观变形和声波; 初始加载阶段波速及各项异性系数 K 均逐渐增加, 之后变化趋缓, 起裂应力后侧向波速开始减小, 而 K 逐渐增大; 峰值应力前裂纹的快速聚结引起AE信号幅值大幅增加, 伴随的是 b 值的快速下降和AE累积能量的陡增; 基于起裂应力后损伤才开始累积的假定, 量化并对比了裂纹体应变、AE事件等多参量表征的损伤演化规律, 发现花岗岩损伤累积绝大部分发生在损伤应力之后。裂纹体应变表征的损伤具有明确物理意义, 但裂纹体应变计算中泊松比选取存在一定主观性, 裂纹体应变、AE能量、模量等参数表征的损伤在接近峰值应力前均出现大幅增加, 与 b 值的快速下降对应。综合对比分析, AE能量表征的损伤具有更好的可靠性, 反映了岩石损伤破裂的本质特征。

关键词: 应力特征值; 声波测试; 声发射; 声发射能量; 损伤表征

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)06-1074-09

作者简介: 张国凯(1988—), 男, 讲师, 博士, 主要从事岩体破裂特征及损伤演化方面的研究工作。E-mail: gkzhang@njjust.edu.cn。

Comparative study on damage characterization and damage evolution of rock under uniaxial compression

ZHANG Guo-kai^{1,2}, LI Hai-bo², WANG Ming-yang^{1,3}, LI Jie³, DENG Shu-xin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
3. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: The evolution of stress-strain data, acoustic emission (AE) and ultrasonic characteristics of granite under uniaxial compression are synchronously tested by using the ultrasonic wave and AE synchronous monitoring devices. The macro- and meso-characteristics of the stress thresholds are analyzed. Also, the quantitative damage evolution of granite is inferred by the crack volumetric strain, AE parameters and ultrasonic characteristics. The results show that the crack initiation stress inferred by the crack volumetric strain and ultrasonic velocity coincides well, and the stress thresholds inferred by the AE events, AE amplitude distribution and b -value are basically identical, but the damage accumulation inferred by the AE events initially begins earlier than that by the macroscopic deformation and ultrasonic testing. At the initial loading stage, the ultrasonic velocity and velocity anisotropy coefficient K increase, and the increase rate slows down gradually. After the crack initiation stress, the lateral velocity begins to decrease, while K gradually increases. With the rapid coalescence of cracks, the amplitudes of AE signals increase significantly prior to the rock failure, accompanied by the rapid decline of b -value and dramatic increase of AE energy. Assuming that the damage accumulation begins only after the crack initiation stress, the damage evolution of granite is characterized by various parameters, such as the crack volumetric strain and AE event. It's revealed that the majority of damage occurs after the damage stress. The damage characterized by the crack volumetric strain has a clear physical meaning, but the selection of Poisson's ratio

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809137); 江苏省自然科学基金项目(BK20180480); 岩土力学与工程国家重点实验室资助项目(Z017015)

收稿日期: 2018-05-14

***通讯作者** (E-mail: gkzhang@njjust.edu.cn)

for calculating the crack volumetric strain is somewhat subjective. The damages characterized by the crack volumetric strain, AE energy and modulus all increase significantly prior to the peak stress, which coincides with the rapid decline of b -value. It's suggested that the damage estimation using the AE energy method should be preferred from the perspective of the reliability of the obtained damage values.

Key words: stress threshold; ultrasonic testing; acoustic emission; AE energy; damage characterization

0 引言

作为一种天然的地质材料, 岩石含有不同程度的初始缺陷, 如不同尺度的裂纹、孔隙等, 在外部压力及环境影响下, 微缺陷逐渐扩展、聚合, 导致其力学特性的劣化。微裂纹的扩展过程常被视为损伤的累积过程, 决定了材料的失稳破坏进程和可持续利用能力。因此, 合理地表征岩石损伤演化过程对工程稳定性控制和安全性预测具有重要意义。

岩石破裂过程中宏观力学及变形特征是其内部微裂纹演化的宏观表现, Brace 等^[1]通过花岗岩的宏观应变测试发现, 初始扩容应力具有加载应变率依赖性。Martin 等^[2-3]基于应力应变特征系统地研究了花岗岩裂纹演化过程, 通过控制损伤的循环加卸载试验, 发现损伤起始应力与循环损伤增加无关, 但损伤应力逐渐下降并最终趋近起裂应力。一般来说, 岩石中裂纹扩展引起的材料性能的退化可作为岩石损伤的一种评价指标, Diederichs^[4]认为岩石刚度的急剧下降对应损伤应力。同样地, 岩石内部的不可逆体积应变也被认为与岩石内部的损伤发展密切相关^[5], 且对应的岩石损伤只有在裂纹开始萌生后才开始发展积累^[6]。

声发射测试技术是研究岩石等脆性材料缺陷扩展的有效手段, 被广泛应用于研究岩石材料内部的损伤和断裂行为^[7-8], 研究人员通过 AE 特征参数来研究岩石断裂特征和过程, 如 AE 事件数^[9]、AE 幅值与频率分布^[10]、AE 能量等^[7], Eberhardt 等^[11]通过 AE 测试研究了 Lac du Bonnet 花岗岩的破坏过程, 发现显著 AE 活动的开始对应新生裂纹的起裂。Lokajicek 等^[12]通过 AE 测试发现粒径较大的花岗岩和粒径较小的麻粒岩分别在 45% 和 85% 峰值强度处裂纹开始扩展。Lockner^[13]发现脆性岩石破坏前 AE 事件率与非弹性应变密切相关, AE 震源定位表明岩石损伤至宏观破坏是由弥散型微破裂逐渐汇聚、局部化的发展过程。Ganne 等^[14]通过 AE 测试技术提出岩石破裂过程中声发射能量累积的 4 个阶段分别对应微裂纹的产生、扩展累积、聚合及最终破坏的发生, 材料破坏之前会表现出明显的能量加速释放特征。Zhang 等^[15]研究了花岗岩、大理岩、盐岩损伤破裂过程中的 AE 特征, 并对三者的损伤演化趋势进行了对比分析。由于 AE 特征参数能够反映岩石破裂活动性, 因此可通过 AE 特

征来表征岩石损伤演化过程, Tang 等^[16]、Eberhardt 等^[17]、刘保县等^[18]分别采用 AE 事件及振铃来表征损伤, 研究了岩石的损伤演化规律。Kim 等^[6]同时对花岗岩进行宏观变形和 AE 测试, 发现 AE 能量比宏观变形对裂纹起裂及扩展更加敏感。

超声测试是另一种无损检测手段, 相比声发射测试, 声波测试受环境影响较小, 在工程岩体损伤测试中便捷可行。King 等^[19-20]通过试验研究发现真三轴加载下板岩波速与裂纹密度呈线性发展, 砂岩呈非线性, 主要是由于波速同时受裂纹密度及导向的共同影响。通过相互垂直或更多方向的波速测试可表征岩石的各向异性^[21], Chow 等^[22]发现在岩石循环加卸载中, 循环加载次数增加, 波速逐渐减小, 且波速各向异性的导向也发生变化。波速变化规律也受原始裂纹的影响, Audrey 等^[23]通过试验发现, 随着应力增加, 完整岩样轴向波速基本保持稳定, 而含裂隙岩样波速先小幅增加, 之后持续减小, 且减小幅度远小于侧向波速, 同时含裂隙试样各向异性大于完整试样, 随着偏应力增大, 波速各向异性逐渐增大, 尤其是含初始微裂纹试样。张国凯等^[24]基于细观尺度颗粒研究了超声特征与裂纹扩展及损伤演化特征的相关性, 并通过试验^[25]测试了花岗岩破裂过程中超声波及声发射的相互变化关系, 获得了声波及声发射特征随加载的变化规律, 但并未对岩石损伤进行量化对比研究。

为了探索岩石在外荷载作用下的损伤演化特征, 本文采用两种测试技术, 即超声波和声发射测试来研究声发射和声波特征变化规律。首先, 分别基于岩石宏观应力应变数据、超声波特征及声发射特征变化来判别裂纹演化对应的各应力特征值, 综合对比岩石的各损伤表征, 利用超声波和声发射特征参数准确评价岩石的损伤渐进演化特征。其次, 尝试综合利用裂纹体应变、宏观模量、AE 特征参数及声波特征参数对岩石的损伤程度及演化过程进行定量评估, 对比各参数表征的损伤演化的差异, 同时采用频率-幅度分析获得 b 值变化规律, 并作为岩石损伤的一个参考依据, 从 3 种测试手段来综合对比岩石损伤演化表征, 最终提出优化的岩石损伤表征方法。

1 试验技术

1.1 岩样制备

本次试验选取了较小孔隙率的花岗岩进行研究,

岩样为取自福建某采石场的新鲜花岗岩，首先肉眼观察岩样表面是否有微裂纹，然后采用声波设备测试花岗岩三个方向波速，选取波速各项异性较小的花岗岩，进而降低数据离散性，通过室内钻芯取样加工成 $\Phi 50 \times 100$ 标准圆柱型试样，试样两端平行度及垂直度均满足规范要求，试验岩样属于中粒花岗岩，平均粒径大约为 1.4 mm，以 5 个岩样为一组进行试验，岩样的平均密度为 2650 kg/m^3 ，弹性模量范围为 $50.4 \sim 52.1 \text{ GPa}$ ，泊松比范围为 $0.24 \sim 0.29$ ，岩样的单轴抗压强度范围为 $171 \sim 178 \text{ MPa}$ 。

1.2 试验系统及设置

试验加载系统采用美国 MTS815.04 电液伺服加载试验机，该系统可同时记录荷载、应力和应变值等，其中轴向应变和环向应变分别采用轴向引伸计和环向应变规进行测试。试验加载方式采用单轴加载，并采用轴向位移控制，加载速率为 0.001 mm/s 。

超声波和声发射监测系统采用中科院武汉岩土力学研究所研发的声波、声发射一体化装置，该系统可实现在连续记录波形信号的同时采集 20 个声发射特征参数，最大采样速率可达 40 MHz 。传感器网络布置如图 1 所示，声波、声发射传感器均采用 Nano30 探头，该传感器对应的频带响应宽度为 $125 \sim 750 \text{ kHz}$ 。传感器布置数量尽量多，同时分散开对岩样进行包裹，距端部要留有一定距离，岩样侧面共布置 12 个传感器，其中绿色传感器 10, 11, 12 作为超声激发探头测试不同方向波传播特征，红色探头同时作为声波、声发射信号接收通道。

试验过程中设置超声激发通道的激发间隔时间，通过仪器内置电压信号发射卡以设定周期向激发通道施加电压脉冲，可实现超声信号的自动激发和接收。本次试验对声波和声发射信号采用全波形记录，采集阈值设为 40 dB ，前置放大器为 40 dB ，通道采样速率为 10 MHz 。试验开始之前，检查传感器与岩样的耦合情况，一切正常后才可进行试验。

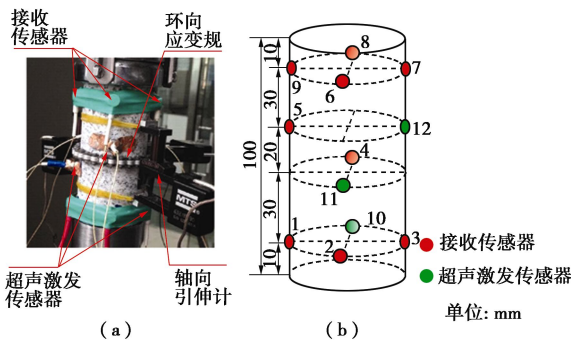


图 1 测试传感器布置图
Fig. 1 Arrangement of testing sensors

2 试验结果与分析

2.1 应力应变数据表征的损伤演化

加载过程中花岗岩典型的应力 - 应变曲线如图 2 所示，花岗岩所经历的几个典型阶段^[2-3]由与微裂纹演化相关的特征应力所分开，即闭合应力 σ_{cc} 、裂纹起裂应力 σ_{ci} 、与永久轴向变形或失稳扩展相关^[26]的损伤应力 σ_{ed} 及峰值强度 σ_c 。通过轴向引伸计和环向应变规测试出轴向应变 ϵ_1 和侧向应变 ϵ_3 ，计算出岩石体应变 $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ ，进而，裂纹体应变可以表示为^[2]

$$\epsilon_v^{cra} = \epsilon_v - (1 - 2\nu)\sigma/E \quad (1)$$

式中， E ， ν 分别代表弹性模量和泊松比。

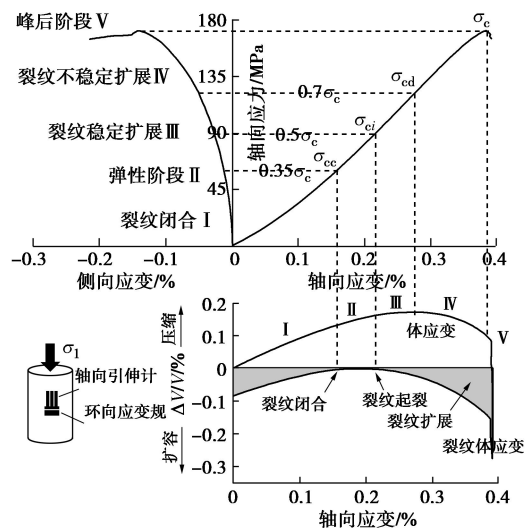


图 2 花岗岩典型的应力 - 应变曲线
Fig. 2 Typical stress-strain curve of granite

岩石作为一种天然缺陷介质，其内部的微损伤主要有两种形式：裂纹（狭长形，纵横比远小于 1）和孔隙（等维球形，纵横比较大），试验证明裂纹对岩石的孔隙度贡献不大，几乎可以忽略（不到 0.1%），但却是影响岩石有效弹性性质的主要因素，而非孔隙，但裂纹却比孔隙更易屈服^[27-28]，在外荷载作用下两种微损伤均会逐渐发生闭合，导致岩石应力应变曲线在加载初期表现出非线性，即宏观刚度的逐渐增大，由于纵横比较小的微裂纹壁面与轴向夹角越大，微裂隙越容易闭合，该阶段变形以最大主应力方向为主导，侧向变形速率较小，随着加载进行岩石内原始裂隙逐渐闭合，闭合应力 σ_{cc} 对应大多数初始微裂隙的闭合，即裂纹体积应变压缩减小到零^[2-3]点，对应于 60 MPa ，这也可以由轴向应力 - 应变曲线增长率的转变推断出来（图 3）。之后闭合的裂隙面产生的摩擦力限制了裂隙面的滑动，导致新生裂纹未能萌生扩展，该阶段宏观应力 - 应变曲线表现为线弹性变化。岩石的初始扩容即对应裂纹起裂应力，宏观表现为裂纹体应变从零

开始增大的起始点^[2-3], 对应于 87.5 MPa。起裂应力后进入裂纹稳定扩展阶段, 该阶段裂纹呈随机分布, 基本不发生相互作用, 随着裂纹密度的增加, 岩石体应变由增加转化为减小, 体应变曲线的反转点对应损伤应力, 在该应力水平以上的外部载荷, 即使在恒定载荷下也会导致材料发生不可耐受的损伤^[2-3, 11]。随着应力继续增大, 裂纹扩展向不稳定开裂(滑动)过程转变, 裂纹扩展速度加快, 当轴向应力达到峰值强度时, 裂纹迅速扩展并形成宏观断裂面, 并迅速导致岩石的最终破坏。

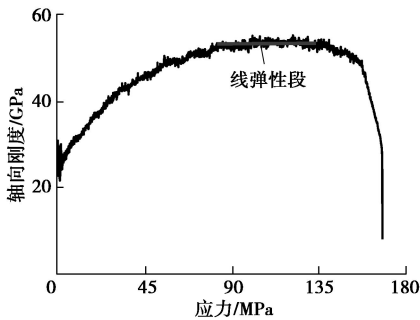


图 3 轴向刚度变化规律
Fig. 3 Variation of axial stiffness

对比裂纹体应变和轴向刚度变化规律, 可以发现轴向刚度加速下降点应力要明显大于裂纹体应变的反转增大应力, 这是由于单轴加载下裂纹沿轴向的导向性扩展引起的^[25], 导致轴向刚度对沿最大主应力方向扩展的张拉裂纹的萌生扩展敏感性较低。

岩石的不可逆体积应变被认为与岩石内部的损伤有关^[5], 一般认为, 岩石的损伤只有在裂纹开始萌生后才开始积累, 因此只有在裂纹起始应力后的裂纹体应变被用来预测岩石损伤^[6]。这里依据计算得到任一应力状态下的裂纹体积应变, 采用岩样最终破坏时的累积裂纹体应变进行归一化处理。而裂纹扩展同样会引起岩样刚度的劣化, 这里定义轴向刚度损失率为岩石切线刚度相比无损状态(这里采用线弹性阶段的刚度代替)的减小比例, 对应的变化如图 4 所示。可以

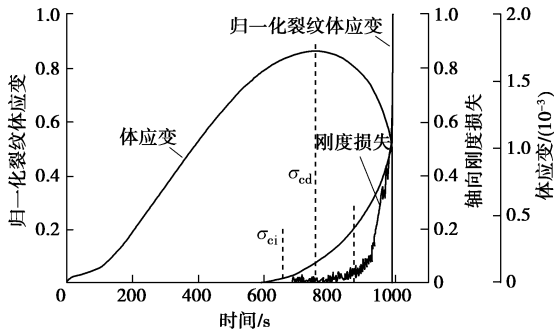


图 4 归一化裂纹体应变和刚度损失的变化规律

Fig. 4 Axial stiffness losses and normalized cumulative crack volumetric strains versus loading time

看出, 归一化裂纹体应变开始增大对应的应力比轴向刚度损失增加应力明显较小, 裂纹扩展初期, 采用裂纹体应变量化的损伤明显较大。Diederichs^[4]认为岩石刚度的急剧下降(刚度损失的急剧增加)对应损伤应力, 显然该点比体应变的反弯点出现的要晚。轴向刚度损失率和归一化裂纹体积应变在损伤应力后开始急剧增大。

2.2 声发射数据表征的损伤演化

通过对 AE 信号处理, 获得 AE 波形的幅值分布及事件率的变化规律如图 5 所示, 观察发现 AE 事件率的峰值与 AE 信号幅值的凸起相互对应。然而由于不同阶段岩石破裂尺度及裂纹扩展释放能量的差异, 导致 AE 事件所对应的信号幅值相差较大, AE 信号幅值范围从初始阶段的 10 mV 左右到破坏前最大值接近 10000 mV, 信号幅值相差高达数百倍。在初始加载阶段, 出现了一系列 AE 事件, 但 AE 信号幅值均小于 100 mv, 此阶段 AE 信号主要是初始微裂纹壁面的相互运动和滑移引起的^[4, 11]。随着应力的增大, AE 事件率逐渐增大, 对应的信号幅值也呈增大趋势, 当应力达到 77.5 MPa, 由于裂纹的萌生扩展, 导致 AE 事件率显著增加, 同时对应的 AE 信号幅值呈现较大幅度的凸起(最大值接近 2000 mV), 该应力对应微裂纹的初始起裂应力, 可看出, 加载初期裂纹闭合引起的 AE 幅值明显小于岩石破裂引起的 AE 幅值。

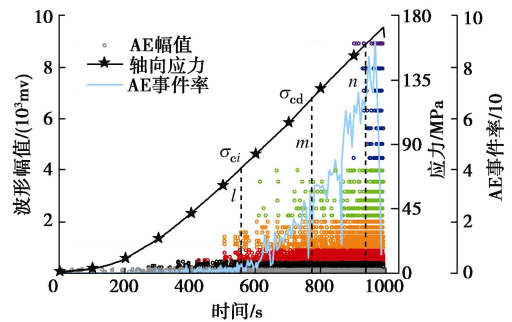


图 5 声发射事件率及对应 AE 信号幅值特征分布

Fig. 5 AE event rates and characteristics of amplitude of AE signal waveforms versus loading time

起裂应力后, AE 事件率逐渐增大, 伴随的是 AE 信号幅值的增加, 逐渐出现了少量幅值大于 2000 mV 的 AE 信号。当应力达到 121 MPa 时(标记 m), AE 事件率快速增大, 同时幅值大于 2000 mV 的 AE 信号迅速增多, 部分 AE 信号幅值高达 4000 mV, 对应损伤应力。之后由于 AE 信号幅值与岩石断裂尺度密切相关, 较大裂纹的张开产生较大幅值的 AE 事件^[10], 结合此时图 4 中刚度损失率的急剧增加, 可以推断出此时裂纹发生相互作用并聚合导致裂纹扩展尺度的增大, 进而产生大幅值的 AE 事件。此后, 声发射活动

迅速增强,当应力达到标记 n 处($95\% \sigma_c$)时, AE 事件率再次陡增,且大幅度 AE 信号迅速增多,部分 AE 幅值接近 10 V,远大于破裂初始信号幅值,AE 事件率和对应的幅值在峰值强度附近达到最大值。

声发射反映了岩石内部破裂的活动性,AE 特征参数与岩石损伤演化密切相关,Tang 等^[16]指出声发射事件与损伤成线性发展,由于声发射事件是空间分布的多个传感器对破裂的反演定位,刘保县等^[18]采用更简单的振铃计数来表征损伤演化过程,而 Kim 等^[6]采用 AE 能量来量化岩石的损伤,可见 AE 特征参数与损伤密切相关。为对比 AE 特征参数的变化关系,对 AE 全波形信号后处理获得事件、撞击、振铃、能量等特征参数变化规律,这里采用岩石破坏时的 AE 累计数量 N_a 对 AE 数 N 进行归一化处理,即归一化比率:

$$n = N / N_a \quad (2)$$

AE 特征参数的归一化比率变化如图 6 所示,在初始加载阶段虽然产生少量 AE 信号,但相比后期岩石破裂的信号数量和对应的幅值及能量极少,在起裂应力(对应标记 l)前,各特征参数的归一化比率均较小,事件率先增大。起裂应力后,事件和撞击数的归一化比率逐渐增大,增加速率明显大于振铃和能量,损伤应力(对应标记 m)附近,振铃和能量增加速率逐渐呈非线性增大,但依然小于事件和撞击增长速率,但当应力达到 $95\% \sigma_c$ (对应标记 n)时,振铃和能量的归一化比率出现剧增,增加速率远大于事件,这是由于此时岩石裂纹发生快速聚结,导致 AE 信号幅度和携带的能量均出现陡增(图 5),此时单个 AE 事件所释放的能量要远大于破裂初始时刻。之后 AE 能量和振铃比率持续陡增直到岩石发生宏观破坏。

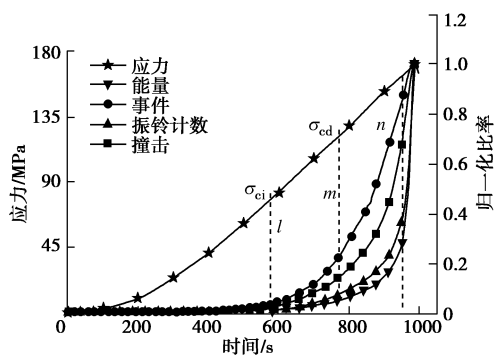


图 6 轴向应力及 AE 参数归一化比率变化

Fig. 6 Variation of axial stress and normalized ratios of AE parameters

AE 特征参数归一化比率在不同应力特征值处如表 1 所示,在裂纹起裂应力处(图 6),AE 特征参数的归一化比率范围从 0.012 到 0.037,且事件、撞击、振铃、能量对应的数值依次减小,尽管各个特征参数

均能识别裂纹的活动性,但对裂纹扩展的敏感度和代表断裂的特征存在差异。损伤应力前,AE 特征参数归一化比率最大达到 0.277,而能量最小仅为 0.065,假定 AE 特征参数与岩石损伤演化直接相关^[17],因此可推断岩石的损伤绝大部分发生在损伤应力之后,即由于裂纹的不稳定扩展引起的,同时各特征参数对岩石破裂造成的损伤特征表征存在较大差异。

表 1 在特征应力处 AE 特征参数归一化比率

Table 1 Nominalized ratios of AE parameters at stress thresholds

归一化比率	AE 事件	撞击计数	振铃计数	能量计数
$N(\sigma_{ci})/N_a$	0.037	0.029	0.014	0.012
$N(\sigma_{cd})/N_a$	0.277	0.169	0.088	0.065
$N(\sigma_{ci})/N(\sigma_{cd})$	0.135	0.171	0.154	0.180

在地震学中,震级较大的事件比震级较小的事件发生的频率要小,最初由 Gutenberg 等在研究世界地震活动性时提出了地震震级与频度分布之间的统计关系式^[29]:

$$\lg N = a - bM \quad (3)$$

式中, a , b 为与地震活动特征有关的常数,其中 b 与裂纹扩展尺度相关, M 表示记录到的地震震级, N 为地震震级大于 M 的地震数目。

采用最小二乘法来计算表征裂纹扩展尺度的 b 值,为了避免计算出现过大大误差,这里取 1000 个声发射信号作为一组数据进行计算, b 值变化如图 7 所示。加载初始阶段,花岗岩声发射 b 值在 1.35 左右,随着应力增加, b 值出现小幅增加,在标记 l 点附近(对应起裂应力), b 值基本达到峰值,之后开始呈小幅波动下降。试验证明较大的 b 值对应着大量的小型 AE 事件的产生,而较小的 b 值则代表大型裂纹或裂纹扩展速率的增大,伴随着大幅度 AE 信号的释放^[30],这可以通过图 5 中 AE 信号幅值的增大来验证,因此 b 值的减小也代表着岩石损伤累积的加剧^[6]。

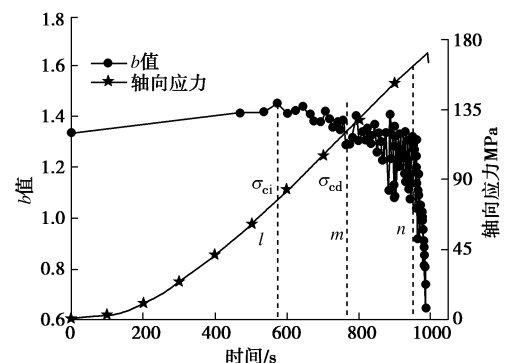


图 7 b 值随加载的变化规律

Fig. 7 Variation of b -value and axial stress for granite against loading time

值得注意的是, b 值在损伤应力后 (标记 m) 虽然逐渐下降, 但出现了较大幅度的波动, 而在标记 n 处 ($95\%\sigma_c$), b 值则出现了剧烈下降, 通过对比发现该点对应 AE 信号幅值的大幅增加, 同时也对应 AE 能量的陡增, 而 Lei 等^[31]指出岩石破坏前 b 值下降的物理机制有两个, 即微裂纹从张拉破坏向剪切破裂为主转变和裂纹发生相互作用聚结, 而本次试验也证明了 b 值的下降对应着 AE 信号幅度的陡增, 这些现象均是裂纹的相互聚合作用引起的。在标记 n 之后, b 值持续下降, 并在破坏前达到 0.65。

2.3 声波数据表征的损伤演化

通过图 1 中传感器网络的布置, 可测试与径向成不同角度方向的波传播规律, 基于波速测试的最大值 V_{\max} 和最小值 V_{\min} 建立改进的反映岩样各项异性的波速表征方法^[21]:

$$K = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\max} \quad (4)$$

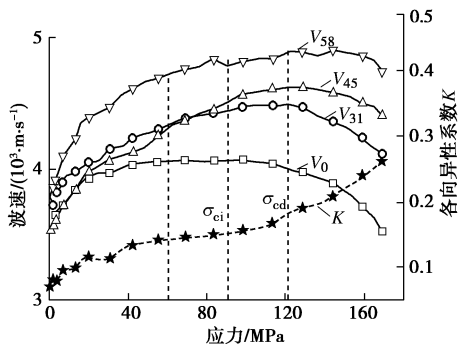


图 8 不同方向波速及波速各向异性系数随应力变化

Fig. 8 Variation of velocities in different orientations and velocity anisotropy coefficient versus loading stress

与径向呈不同角度方向波速变化及对应的波速各项异性系数如图 8 所示, V_0 , V_{31} , V_{45} , V_{58} 分别表示侧向波速及与侧向呈 31° , 45° , 58° 方向波速, 初始加载时刻, 由于岩石内部微裂纹和孔隙的不均匀分布导致波速各项异性系数达到 0.07, 随着应力的增大, 纵横比较小的微裂纹逐渐发生闭合, 进而引起波速的逐渐增大, 而在偏应力加载下, 原始微裂纹的闭合也具有导向性^[25], 这就导致不同方向波速增量差异的逐渐增大, 即波速各项异性系数 K 的逐渐增大, 但波速和 K 随应力增加的速率却呈逐渐减小的趋势, 这是由于具有较小纵横比的微裂纹对应的闭合应力较小, 初始阶段, 在较小应力增量下同样会发生较多的裂纹闭合, 而随着应力增大, 较小纵横比微裂纹基本闭合, 而较大纵横比的微裂纹则需要更大的应力增量才能闭合, 进而导致波速随应力的增速逐渐下降。当应力达到标记 A (对应图 2 中 σ_{cc}), V_0 基本达到峰值, 同时 K 在虚线 A 与 B 之间基本保持稳定, 标记 B 对应起裂

应力, 该应力之后, 裂纹逐渐开始沿最大主应力方向扩展, 导致不同方向波速差异逐渐增加, 而 K 则逐渐呈小速率增大。当应力超过损伤应力后 (标记 C), V_0 下降速率逐渐增大, V_{58} 则基本不变, 伴随着的是 K 的加速增大, 在峰值应力前, K 达到 0.27。

3 关于损伤演化的量化讨论

上述讨论了岩石破裂过程对应的宏观变形、声发射和声波特征变化, 研究了与岩石损伤有关的特征, 这里试图用这些特征参量来定量研究脆性断裂引起的损伤。岩石材料中裂纹扩展引起的材料性能的退化可作为岩石损伤的一种指标, Kachanov^[32]提出了基于连续介质损伤力学的材料损伤与有效模量之间的关系:

$$D = 1 - E/E_0 \quad (5)$$

式中, E , E_0 表示材料受损和未受损时的弹性模量。然而, 由于天然岩石含有不同尺度的微裂纹和孔隙, 而微裂纹, 尤其是孔隙的完全闭合需要极高的压力, 很难获得完整无损岩石的弹性模量, 因此这里采用裂纹闭合后的模量 (线弹性段) 来代替。

Kawamoto 等^[33]基于岩石各向同性假设, 建立了波速与岩石损伤之间的量化关系:

$$D = 1 - (V/V_0)^2 \quad (6)$$

式中, V , V_0 代表损伤岩样及完整无损岩样的波速。

由于完全无损的岩石波速难以获得, 这里采用侧向波速加载过程中的最大值来代替。这里假定岩石损伤只有在裂纹开始萌生后 (宏观波速的开始下降点) 才开始积累, 即只考虑裂纹起始应力后的声波特征变化。另一方面, 由于接近岩石宏观破裂时, 短时间内释放大量大幅值 AE 信号, 导致主动激发的声波透射信号难以分辨, 进而临近岩石破坏的波速测试存在困难, 因此, 这里只测试到峰值应力前的波速变化, 此时对应的损伤变量为 0.259。此外, 上述损伤是基于损伤材料密度和泊松比的恒定假设, 然而侧向应变的非线性增加和泊松比的变化^[25]证明会随载荷而变化, 尤其是在损伤应力后。

Tang 等^[16]假定声发射事件与损伤成线性发展, 也有学者基于更简单的振铃计数^[18]和能表征岩石破裂物理含义的能量来研究损伤演化过程^[6]。假定岩石最终破坏时刻完全损伤 ($D=1$), 因此这里可以建立岩石损伤与归一化 AE 特征参数的等效关系:

$$D = N/N_a \quad (7)$$

Kim 等^[6]和 Eberhardt 等^[17]均采用宏观变形来量化岩石的损伤状态, 而岩石的不可逆变形与其内部的损伤直接相关^[5], 因此这里采用反映裂纹扩展演化的裂纹体应变来定义损伤变量:

$$D = \varepsilon_v^{cra} / \varepsilon_{va}^{cra}, \quad (8)$$

式中, ε_v^{cra} , ε_{va}^{cra} 分别表示在某一应力状态下的裂纹体应变和岩石完全损伤破坏时的累积裂纹体应变, 理论上讲, 在弹性阶段损伤并不发生累积, 因此这里只考虑起裂应力后的裂纹体应变。

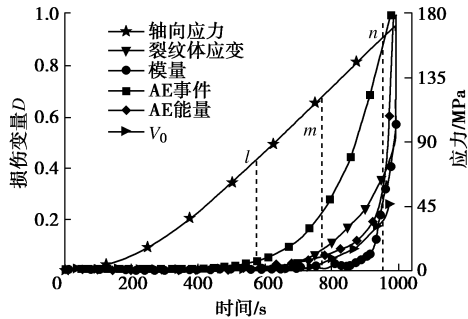


图9 基于应力应变、声发射和超声方法定量损伤的比较

Fig. 9 Comparison of quantitative damages represented by stress-strain, acoustic emission and ultrasonic methods

不同参数表征的岩石损伤演化如图9所示, 图中标记 l , m 对应 AE 事件的起裂应力和损伤应力。结果表明, 在裂纹起裂应力前, 损伤基本为零, 起裂应力之后损伤才开始累积, 然而, 不同特征参数表征的损伤起始应力存在显著差异。表2统计了以宏观计算应变法识别的起裂应力及损伤应力处的各损伤变量值。花岗岩在宏观起裂应力处的损伤表征范围为 $0 \sim 0.063$, 其中 AE 事件表征的损伤最大, 但模量和波速尚未表现出劣化。在损伤应力 121 MPa 处, 不同参量表征的损伤差异更大, 范围为 $0.004 \sim 0.230$, 同样是 AE 事件表征的损伤值最大, 模量表征的损伤值最小, 可得出岩石的损伤累积绝大部分发生在损伤应力后。当应力达到标记 $n(95\% \sigma_c)$ 时, 裂纹体应变、AE 能量、模量等参数表征的岩石损伤发生快速陡增, 对应裂纹的快速扩展贯通。

表2 在特征应力处不同参量表征的损伤

Table 2 Comparison of damage levels quantified by different methods

表征方法	AE 事件	AE 能量	裂纹体应变	模量	波速 V_0
$D(\sigma_{ci})$	0.063	0.017	0.003	0	0
$D(\sigma_{cd})$	0.230	0.057	0.077	0.004	0.036
$D(\sigma_{ci})/D(\sigma_{cd})$	0.274	0.298	0.039	—	—

宏观裂纹体应变表征的岩石损伤演化过程具有明确的物理意义, 然而裂纹体应变的计算高度依赖于弹性模量和泊松比的选取, 尽管弹模的选取可通过应力应变线弹性段来获得, 但由于试验岩样侧向的非线性变形, 导致泊松比的选取具有较大的主观性^[6,11]。此外 AE 事件表征的损伤起始点出现的相对较早, 且在

整个破坏过程中损伤量值一直保持最大, 但其表征的损伤渐进性演化特征较突出。另一方面, 超声测试是一种方便快捷且在工程岩体损伤状态和区域测试可行的方法, 然而脆性岩石破坏前的声波测试存在较大困难, 进而很难用声波特征来评估岩石临近破坏阶段的损伤演化, 但值得说明的是波速与 AE 能量量化的损伤差异较小。岩石切线模量表征的损伤直接反映了岩石力学特征的弱化过程, 但该方法明显高估了损伤起始应力, 同时评估的损伤程度远低于其它特征方法, 且在接近峰值强度附近, 其变化波动较大, 并且对数据选取间隔存在一定依赖性^[11]。

不同 AE 特征参数表征的损伤演化规律同样存在较大差异, 这主要是由于不同阶段岩石破裂对应的 AE 波形特征的差异所致。图5中岩石破裂不同阶段, 单个 AE 震源事件对应的信号幅值可以相差巨大, 而对应的能量差异会更大。另一方面, AE 事件是空间内多个传感器依据岩石破裂释放弹性波达到时间的差异反演出破裂位置, 而并不是所有岩石破裂释放的声发射信号都能精确定位获得事件数, 这里为了增加定位事件的准确性, 只考虑 AE 震源事件被至少五个传感器拾取并定位的 AE 信号, 同时试验证明, 用于震源定位的速度模型和定位算法也能影响破裂的 AE 定位事件^[21,23]。对于脆性岩石, 在最终宏观破裂前, 短时间内有上千个声发射信号释放, 此时会出现较多突发声发射信号交叠在一起形成连续信号, 以至于单个声发射事件可能包含多个微破裂, 但现有的采集设备及处理方法不能将所有的 AE 信号全部精确定位, 造成部分声发射事件的遗漏, Lockner^[13]认为能准确探测到的 AE 事件比花岗岩实际发生的微裂纹损伤小得多。因此岩石破裂所能精确定位的 AE 事件, 尤其是接近脆性岩石破坏时, 要明显小于实际数量, 同时破裂初期产生的单个 AE 事件对应的岩石损伤累积明显要小于邻近破坏时的 AE 事件, 而采用 AE 能量来表征损伤演化能够一定程度消减前期微破裂释放的小幅值 AE 信号, 及邻近破坏前信号叠加的影响。同时能量转化是材料物理变化的本质特征, 能量驱动也是岩石破坏的诱因^[34], 因此岩石破裂释放的 AE 能量表明了岩石破坏的本质特征, 同时, 作为反映岩石破裂尺度的 b 值, 其快速下降对应着裂纹的快速聚结及损伤的快速发展, b 值的快速下降与 AE 能量表征的损伤的快速增加吻合(对应标记 n), 因此采用 AE 能量来表征岩石损伤演化更加合适。

4 结 论

(1) 花岗岩裂纹体应变与侧向波速变化趋势及对

应的应力门槛值吻合较好, 特征参量表征的损伤起始应力大小顺序为: AE 事件 < 波速 V_0 = 裂纹体应变 < 轴向刚度, AE 事件率、幅值分布、 b 值分析所对应的起裂应力和损伤应力较一致, 岩石峰值强度前, b 值的快速下降对应 AE 幅值及能量的陡增, 对应裂纹快速聚结并发展成为宏观主裂纹。

(2) 花岗岩初始压密段波速逐渐增加, 由于裂纹的导向性闭合, 波速各项异性系数也逐渐增加, 但增加速率逐渐减小, 并在闭合应力处趋于稳定, 起裂应力后, 裂纹主要沿轴向扩展, 波速各项异性系数逐渐增大, 峰值强度前达到 0.27。

(3) 花岗岩的损伤累积绝大部分发生在损伤应力后, 裂纹体应变表征的损伤物理意义明确, 但计算参数选取存在一定主观性, AE 事件表征的损伤率先开始累积, 且损伤量值保持最大, 但损伤渐进性演化特征突出, 不能很好表征临近破坏前的加速累积过程。

(4) 裂纹体应变、AE 能量、模量等参数表征的损伤在峰值应力前出现大幅增加, 与 b 值的快速下降对应, 综合分析, AE 能量表征的损伤受主观因素影响较小, 反映了岩石损伤破裂的本质特征。

参考文献:

- [1] BRACE W F, PAULDING B W, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **71**(16): 3939 - 3953.
- [2] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1994, **31**(6): 643 - 659.
- [3] MARTIN C D. Seventeenth canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(5): 698 - 725.
- [4] DIEDERICHS M S. Manuel rocha medal recipient rock fracture and collapse under low confinement conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2003, **36**(5): 339 - 381.
- [5] SU K, GHOREYCHI M, CHANCHOLE S. Experimental study of damage in granite[J]. *Géotechnique*, 2000, **50**(3): 235 - 241.
- [6] KIM J, LEE K, CHO W, et al. A comparative evaluation of stress-strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, **48**(2): 495 - 508.
- [7] GANNE P, VERVOORT A. Effect of stress path on pre-peak damage in rock induced by macro-compressive and -tensile stress fields[J]. *International Journal of Fracture*, 2007, **144**(2): 77 - 89.
- [8] YANG S Q, JING H W. Strength failure and crack coalescence behavior of brittle sandstone samples containing a single fissure under uniaxial compression[J]. *International Journal of Fracture*, 2011, **168**(2): 227 - 250.
- [9] DIEDERICHS M S, KAISER P K, EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, **41**(5): 785 - 812.
- [10] 曾 鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(3): 509 - 517. (ZENG Peng, LIU Yang-jun, JI Hong-guang, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(3): 509 - 517. (in Chinese))
- [11] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(2): 222 - 233.
- [12] LOKAJIČEK T, GOEL R K, RUDAJEV V, et al. Assessment of velocity anisotropy in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, **57**: 142 - 152.
- [13] LOCKNER D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, **30**(7): 883 - 899.
- [14] GANNE P, VERVOORT A, WEVERS M. Quantification of pre-peak brittle damage: correlation between acoustic emission and observed micro-fracturing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, **44**(5): 720 - 729.
- [15] ZHANG Z, ZHANG R, XIE H, et al. Differences in the acoustic emission characteristics of rock salt compared with granite and marble during the damage evolution process[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(11): 6987 - 6999.
- [16] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and kaiser effect function[J]. *Journal of Seismological Research*, 1990, **13**(2): 203 - 213.
- [17] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B. Quantifying

- progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, **36**(3): 361 - 380.
- [18] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009(增刊 1): 3234 - 3238. (LIU Bao-xian, HUANG Jing-lin, WANG Ze-yun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009(S1): 3234 - 3238. (in Chinese))
- [19] KING M S. Elastic wave propagation in and permeability for rocks with multiple parallel fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, **39**(8): 1033 - 1043.
- [20] KING M S, CHAUDHRY N A, SHAKEEL A. Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, **32**(2): 155 - 163.
- [21] PETRUŽÁLEK M, VILHELM J, RUDAJEV V, et al. Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, **60**: 208 - 216.
- [22] CHOW T M, MEGLIS I L, YOUNG R P. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite: II Ultrasonic tomographic imaging[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1995, **32**(8): 751 - 761.
- [23] OUGIER-SIMONIN A, FORTIN J, GUÉGUEN Y, et al. Cracks in glass under triaxial conditions[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2011, **49**(1): 105 - 121.
- [24] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 岩石波速与损伤演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, **34**(11): 2270 - 2277. (ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Wave velocity and damage development of rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, **34**(11): 2270 - 2277. (in Chinese))
- [25] 张国凯, 李海波, 夏祥, 等. 单轴加载条件下花岗岩声发射及波传播特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, **36**(5): 1133 - 1144. (ZHANG Guo-kai, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Experiment study on acoustic emission and wave propagation in granite under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, **36**(5): 1133 - 1144. (in Chinese))
- [26] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock, Parts II and III[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1985, **22**(6): 395 - 430.
- [27] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **73**(6): 2225 - 2236.
- [28] FORTIN JÉRÔME, GUÉGUEN YVES, SCHUBNEL ALEXANDRE. Effects of pore collapse and grain crushing on ultrasonic velocities and V_p/V_s [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, **112**(B8): 582 - 596.
- [29] GUTENBERG G, RICHTER C F. Seismicity of the earth and associated phenomena, Howard Tatel[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1950, 55: 97.
- [30] RAO M V M S, LAKSHMI K J P. Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. *Current Science*, 2005, **89**(9): 1577 - 1582.
- [31] LEI X L, KUSUNOSE K, RAO M V M S, et al. Quasi - static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, **105**(B3): 6127 - 6139.
- [32] KACHANOV L M. Time of the rupture process under creep conditions[J]. *Izv Akad Nauk SSR Otd Tech Nauk*, 1958, **8**: 26 - 31.
- [33] KAWAMOTO T, ICHIKAWA Y, KYOYA T. Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1988, **12**(1): 1 - 30.
- [34] 谢和平, 鞠杨, 黎立云, 等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(9): 1729 - 1740. (in Chinese))