

大理岩单轴受压破坏过程的声发射特征研究

周忠良, 屠晓利

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 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。

关键词: 大理岩; 单轴压缩; 天然裂隙; 声发射; 高频信号

1 前言

目前, 在矿山的开采过程中, 声发射监测还只能作为预测预报矿山灾害事故的补充手段。虽然国内外一些学者对岩石声发射信号进行一些有益的研究^[1-6], 但把声发射作为一种监测岩体的稳定性, 预测预报可能发生事故的可靠性手段尚还存在许多困难。一方面是由于声发射理论自身的不足, 另一方面则是因为各种岩石的不同结构构造。岩石是一种依赖于材料性质, 外部条件的一种复杂变形体, 因其形成环境条件、矿物成分及组成结构、胶结物不同, 并且后期所受到的地质构造作用也不尽相同, 必然有不同的结构。这些不同结构岩石在受到不同方式的破坏力时, 其声发射特征也不相同。因此有必要对岩石受力破坏过程中的声发射特征进行进一步的研究。有利于提高声发射系统对岩体稳定性监测以及对可能发生事故预测预报的可靠性。本次试验采用大理岩试件, 对在不同加载速度下试件破坏的声发射特征进行了研究。尤其是对含天然裂隙的大理岩的研究, 其声发射特征和破坏形式与完整试件有很大的区别, 对进行岩体的稳定性分析有着方向性作用。对大理岩单轴压缩破坏过程下声发射高频部分的特征与分布也进行了研究。

2 实验室试验

由于岩石在岩体结构中的破坏主要以压缩外载荷作用下的内部张裂破坏为主, 因此本次试验采用对大理岩进行单轴压缩, 并且选择无明显裂隙和含天然裂隙两种试件进行加载, 研究它们全破坏过程声发射信号的特征和规律。

试验采用 MYL-500 刚性压力机、美国 PAC 公司生产的 PCI-2 便携式 4 通道声发射监

测系统和SA-4 动态应变仪三套设备。为了测定大理岩单轴受压破坏的声发射大事件,选定声发射的门槛值为 80dB。选用型号为 R15 的探头两枚,探头峰值频率为 140.62KHz,频率响应范围为 20~600KHz。为了保证探头与试件接触良好并尽可能的减少噪声的影响,将探头表面涂一层黄油,用松紧带固定在试件上。试验时,保持加载过程与声发射监测同步。声发射测试系统如图 1。

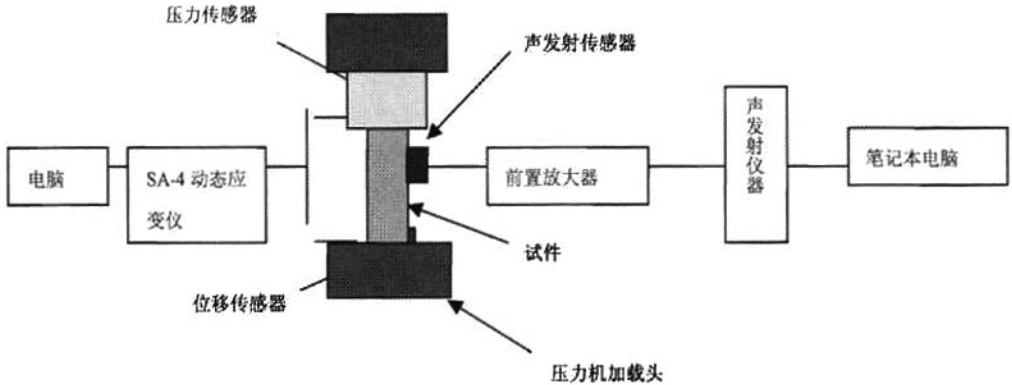


图 1 大理岩单轴压缩声发射测试系统

岩样取自一镁矿 236 中段爆破现场及露天采场剥落的大理岩,其结晶程度较高。试件加工成 5cm×10cm (直径×高)的圆柱体,误差在允许范围内,其平行度、平整度和垂直度均符合试验规程。在选用的试件中有三块含有天然裂隙。对无明显裂隙大理岩试件采用不同的加载速度及对含天然裂隙大理岩试件进行了单轴压缩全过程破坏试验。通过对试验数据的研究找出各种情况下大理岩的应力-应变关系特性和声发射的某些特征,并探索大理岩声发射信号高频部分的分布特征。

3 试验结果分析

3.1 压力、声发射累计数与时间的关系

在所做的试验中,条件相同的情况下试样的破坏形式和声发射特征基本相同。试件整体强度不高,在最大载荷下瞬间破坏,即呈现出崩裂破坏特征,裂纹沿试件中央几乎垂直劈开。声发射事件也主要集中在最大载荷时试件破坏前后的时间内。这些特性都说明此大理岩晶粒较粗、质地软、裂隙发育,刚度特性较强。

图 2 给出了压力、声发射累计数对数随时间变化的曲线。

加载初期几乎没有或只有少量的声发射事件产生,一般在载荷将达到其峰值强度的 30%~40%时,声发射数开始增多,达到 80%,声发射数量则开始有显著的增加。在试件破坏前声发射数量达到峰值,破坏后也会有一次声发射事件的突增。

表 1 列出了载荷、时间和声发射累计数以及载荷变化量、时间和声发射的变化量的对应关系。从表中可以发现开始声发射事件率并不大,平均一秒钟不到一次。随着载荷的增加事件率有所增加并开始处于相对较稳定的时期,在这段时间内压力和时间的都是等量增长,声发射累计数据也是比较均匀变化的,在载荷达到其峰值强度的 80%

左右时，此时虽然压力和时间仍然都是等量增长，声发射事件率却是随着时间逐级递增直到试件破坏前的某一时刻达到最值，到试件破坏后又有一个新的最值产生。事实上，在试件破坏前的这一时刻到试件破坏的这一时间段内，等压力增长的情况下时间变化量已经有所增加，此时的声发射数量比较少，为试件整体破坏前的沉默期。在图 2 中我们会发现以时间为自变量的声发射累计数曲线在大约 280 秒处其斜率明显减缓并趋于水平，这段时间就是平静期。平静期也是试件完全破坏前的能量累积阶段。试件破坏的瞬间也会有少量声发射事件产生，载荷是达到了最高水平，接着在极短的时间内载荷迅速降到其峰值水平的 20%。

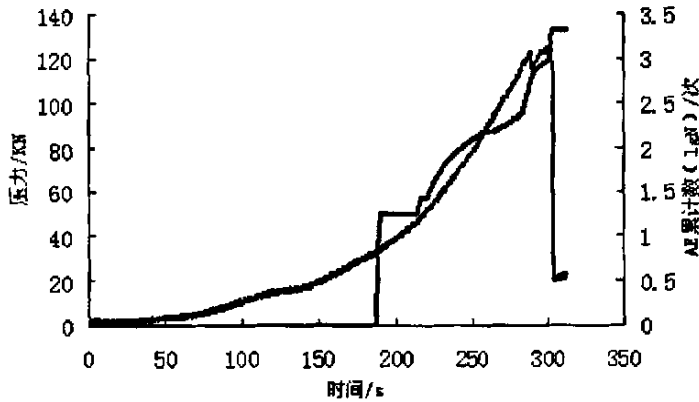


图 2 压力、声发射累计数-时间关系曲线

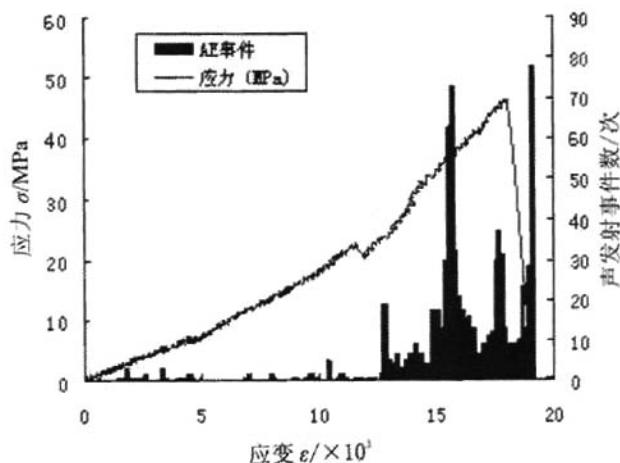
表 1 压力、时间和累计声发射数的试验结果

压力/kN	时间/s	声发射累计数/次	压力变化量/kN	时间变化量/s	声发射变化量/次
35	192	18	35	192	18
50	217	27	15	25	9
65	237	70	15	20	43
80	251	116	15	14	46
95	265	149	15	14	33
110	278	211	15	13	62
125	300	1138	15	22	927
24	302	2086	101	2	948

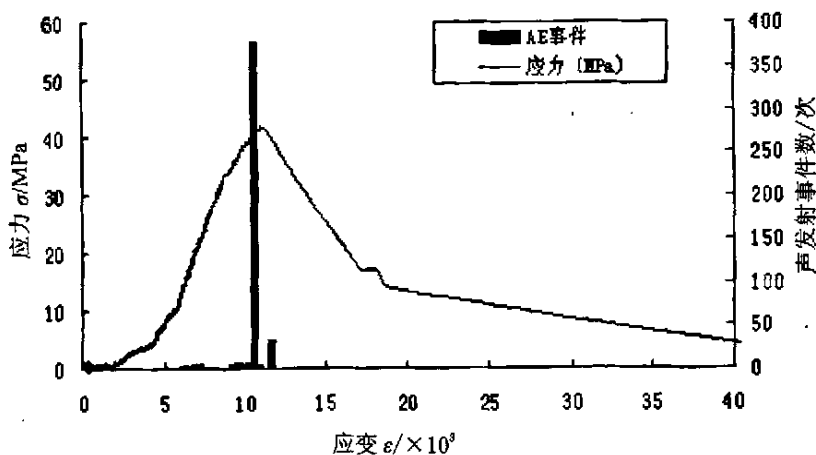
3.2 不同加载速度下应力、应变与声发射的关系

不同的加载速度直接影响到岩石的单轴抗压强度，同时也会影响到声发射的数量。一般来说，试验的加载速率越大，岩块的抗压强度越高。这主要是因为随着加载速率的增加，试件内部的微裂纹和微裂隙来不及充分扩展，出现变形滞后应力的现象，增加了岩块的强度。图 3 (a)、(b) 分别是岩样 a、b 在加载速率为 0.2MPa/s, 0.05MPa/s 时的单轴压缩破坏全应力、应变与声发射的关系曲线。图 3 中虽然不是很明显，但是我们仍

能分辨出 (a) 的峰值应力要大于 (b) 的峰值应力。大理岩试件 (a) 的声发射事件数总数是 4893 个, 事件的产生几乎伴随着整个加压过程, 事件分布范围较宽; 试件 (b) 的声发射事件数总数是 3724 个, 事件仅在峰值应力前后产生。无论是从声发射总数上看, 还是从声发射的分布范围来看, 都说明加载速度越快, 大理岩的声发射事件越容易产生。



(a) 加载速率 0.2MPa/s



(b) 加载速率 0.05MPa/s

图 3 不同加载速度的应力、应变与声发射关系

在初始的非线性压密阶段, 大理岩内部的孔隙和裂隙逐渐闭合。试件 a 有少量的声发射事件产生, 试件 b 没有。应力—应变曲线前者线性度较好, 后者则向上弯曲。线弹性变形阶段, 也是声发射的稳定阶段。试件 a、b 都有少量的声发射事件产生, 两者该阶段的应力—应变曲线近似直线型。到了微裂纹稳定扩展阶段以后, 声发射逐渐增加, 但是试件 a 的应力有一个小小的波动, 这是由于裂纹扩展时, 造成应力松弛, 储存的部分

能量以应力波的形式释放出来。在 (a) 图中我们也可以看到, 在此点声发射事件突增然后趋于平稳。非稳定破裂发展阶段也是产生声发射事件最多的阶段, 此时应力也达到最大值。从 (a) 图中可以看到在离最大应力还有一段距离的时候就有大量的声发射事件产生紧接着事件减少, 到最大应力的时候又有一个小范围的突增, 但是数量却明显的少于应力为 时的声发射事件。(b) 图中, 在接近最大应力时, 声发射也是急剧增加, 其增加的幅度要远远高于图 (a)。

3.3 含天然裂隙大理岩声发射特征

此次加载的三个有裂隙试件所含裂纹均是沿着左上一右下的方向贯通整个试件。通过对试验的观察, 三个试件都是沿着天然裂隙整体破坏的, 没有新的翼形裂纹萌生。三个试样的声发射图也很相近, 因此我选取了一个较有代表性的试件 c 的应力、应变与声发射关系图, 见图 4。

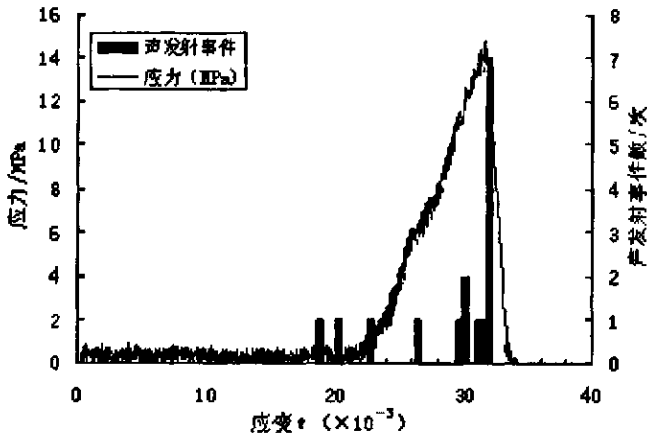


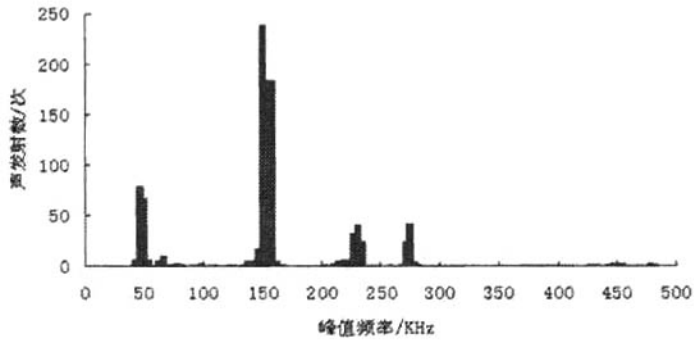
图 4 含天然裂隙试件的应力、应变与声发射关系

总体来看该试件的应变较大, 应力不大约 15 MPa, 声发射事件总数也很少。从开始的很长一段时间内, 应力几乎保持不变, 而应变却变化很大, 从 0 增致 20, 在此期间仅在最后有两个声发射事件产生。随后应力开始显著增加, 此时应力—应变曲线的线性度较好, 声发射事件也间歇性的产生。在刚过峰值应力有一个声发射大的突增, 接着声发射不再产生, 应力突降, 应变也很小, 试件沿着天然裂隙整体破坏。

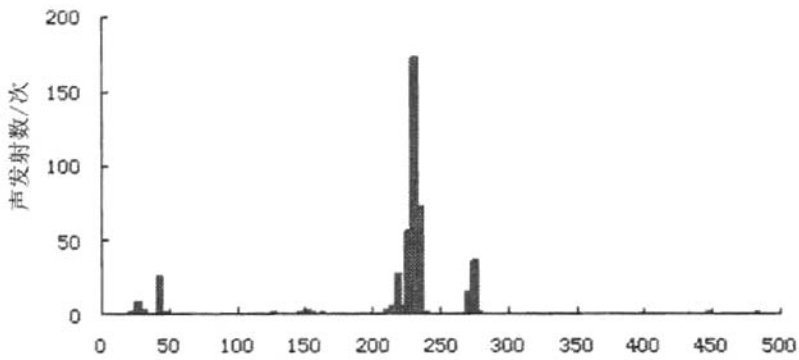
3.4 大理岩的声发射频率

岩石 AE 信号以低频为主, 但不同岩石的 AE 信号主频不同。大理岩较平缓, 主频位于 4KHz 以下, 而且岩石的强度越高 AE 的主频也越宽^[9]。正是因此, 以往研究人员所做的岩石单轴压缩试验中所关心的都是频率相对较低的声发射信号, 因此高频部分的信号就往往会被忽略掉。但是这些低频信号容易受到噪声的干扰, 尤其是在生产现场用于监视大型构件的结构完整性时, 真实声发射信号就更容易混杂噪声信号。因此, 研究试件声发射信号的高频部分具有实际意义。

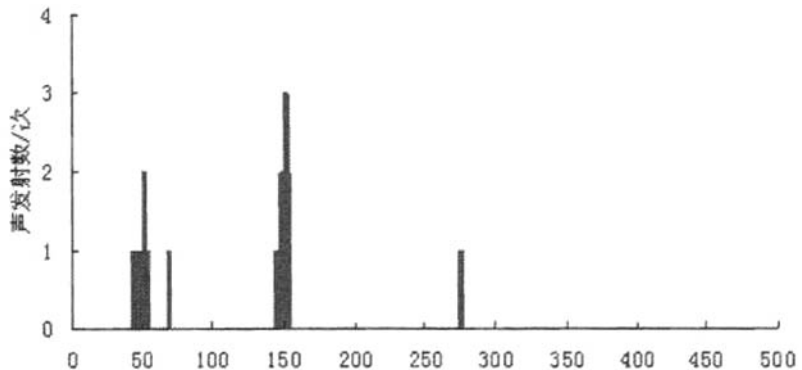
图 5 中的 (a)、(b)、(c) 图分别是岩样 a、b、c 三个试件的声发射频率分布图。通过对三个试件频率分布图的对比发现，由于加载速度和岩石内部节理、裂隙等因素的影响，导致各频段范围内的声发射数量不同。



(a) 加载速率 0.2MPa/s



(b) 加载速率 0.05MPa/s



(c) 含有天然裂隙的大理岩

图 5 大理岩声发射频率分布

图 5 (a)、(b) 中声发射信号都分布在以 50kHz、150kHz、225kHz 和 275kHz 为中心

的区域内。只是在加载速度减小的情况下[图 5 (b)], 声发射主要集中在以 225kHz 为中心的区域内, 150kHz 频域内声发射数有明显的减少。从图 5 (c) 中可以发现含天然裂隙大理岩的高频率声发射数要比 (a)、(b) 图中的明显减少。在试件的整个单轴压缩过程中声发射的时间分布范围越宽泛, 其高频的频域分布越宽, 但频率小于 200MHz 的信号比重要大; 反之, 当接收到的声发射信号发生在短时间内, 信号的高频频率就比较单调, 且多数信号频率都要高于 200MHz。所以说试样如果是突发性破坏, 就更容易监测到频率单调的高频信号; 试样如果是逐步破坏, 信号的频率成分就较复杂, 相对于突发性破坏的试件的中心频率要低。

4 结 论

通过以上对无明显裂隙和含天然裂隙的大理岩试件单轴压缩试验获得的声发射信号分析, 可以得出以下几点结论。

(1) 试验表明加载速度越快声发射数越多, 而且时间范围内分布广泛。说明了声发射的产生与大理岩的受力方式有很大关系。

(2) 一般声发射信号峰值期发生在最大应力前后的时间点, 但是最大应力时也会有少量声发射产生。

(3) 加载速度的不同对声发射信号的频率分布影响较大, 而是否含有天然裂隙则决定了高幅值声发射信号的多少。

(4) 大理岩声发射高频信号主要在四个区间, 加载速度越慢信号越趋向于高频。但是与不同频率相对应的破坏形式还有待于进一步的研究。

参考文献

- [1] 李银平, 曾静, 陈龙珠. 含预制裂隙大理岩破坏过程声发射特征研究[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 290-293
- [2] 谢强, 张永兴, 余贤斌. 石灰岩在单轴压缩条件下的声发射特性[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24 (1): 19-22
- [3] 潘长良, 祝方才, 曹平, 等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. 中南工业大学学报, 2001, 32(4): 336-338
- [4] 陈顺云, 许昭永, 杨润海, 等. 含 V 形构造花岗岩块体破坏过程中的声发射特征[J]. 地震地质, 2003, 25(2): 317-326
- [5] 蒋宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1810-1814
- [6] V Rudajev, J Vilhelm, T Lokajiček, et al. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2000, 37: 699-704
- [7] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32 (1): 17-21
- [8] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499-2503

Study on acoustic emission characteristics of marble failure in uniaxial compression

ZHOU Zhong-liang, TU Xiao-li

(College of resource and Civil Engineering Northeastern University,
Shenyang 110004 China)

Abstract: Experiment on acoustic emission characteristics of full process marble failure are carried out on stiffness test machine. Two kinds of specimens including integrated specimens which are under different speed of load and the specimens having nature cranny are chosen in the experiments. The mechanical properties of marble and acoustic emission characteristics, including full-regime curves, distribution of whole AE events in time and distribution of high-frequency AE signals in frequency are obtained. The results show that marble is apt to engendering more AE signals under high-speed load; the time when the two AE peak-signals burst is before and after the most stress and not the time when the most stress burst; the other one indicate the existence of the rump stress; marble can engender high-frequency, high-amplitude AE signals. It couldn't be affected by any load conditions and the conditions themselves, the distribution of high-frequency is the same in term of macroscopical rules.

Key words: marble; uniaxial compression; nature cranny; acoustic emission; high-frequency signal

大理岩单轴受压破坏过程的声发射特征研究

作者: [周忠良](#), [屠晓利](#)

作者单位: [东北大学, 资源与土木工程学院, 辽宁, 沈阳, 110004](#)

相似文献(5条)

1. 期刊论文 [倪晓慧, 朱珍德](#) 大理岩单轴受压全过程细观损伤量化研究 -世界科技研究与发展2009, 31(4)

设计基于SEM的大理岩细观损伤全程数字化跟踪试验方案,对四川锦屏大理岩试样进行了单轴压缩细观损伤的全程试验。基于数字图像处理技术,对微裂纹的萌生、生长及贯通过程进行定量分析,提取试样在受荷过程中微裂纹的面积、方位角、长度、宽度和周长基本几何数据,然后利用统计学理论对获取到的32组试样微裂纹的损伤全过程的细观信息进行了统计分析,得到在单轴压缩过程中微裂纹的方位角、长度和间距服从变参数的广义极限分布这一结论,最后引入G. Swoboda损伤理论,模拟得到单轴压缩试验的应力-应变关系,并与实际试验的结果进行了比较。结果显示可以较准确地模拟单轴压缩力学状态下的应力-应变关系。

2. 学位论文 [郑建业](#) 基于扰动状态理论的若干岩土力学基础问题研究 2007

扰动状态理论(DSC)认为材料响应是两种参考响应的加权平均,处于相对完整状态下的材料响应和处于调节后状态下的材料响应以一个扰动因子作为权重相加,构成材料的真实响应。理论要求选择合适的本构模型用于描述参考状态的响应。单屈服面分级模型 HISS一般可以用来描述相对完整状态的材料响应。

本文对 DSC 理论全貌做出深入介绍和述评,叙述了理论的发展源流,比较了理论与内时理论、损伤理论和非局部模型理论的区别,指出DSC的相对优势。指出 DSC 的显著优点之一是问题可以保持在应力空间中得到解决,而不涉及应变空间。简介了国内外学者的工作。

本文对DSC做出合理性细观分析,利用硬化土和软化土的宏观剪切实验与同时进行的细观 CT 实时实验结果对照,通过土体的硬化现象或软化现象与相应CT数变化的关系,说明理论分析和解决问题所采取步骤的逻辑合理性。硬化或软化时CT 数的变化差异对应着扰动因子D的叠加与否。硬化现象的描述不需要叠加扰动因子,软化现象的描述需要叠加扰动因子。不论是否存在薄弱区,材料 CT 数的相对变化量都显示上述规律。提出一个新的扰动因子演化方程,以材料各层 CT 数均值的算术平均值作为演化方程的自变量。应用方程描述了软化灰色粉质粘土的应力-应变关系曲线,结果表明,DSC 解决问题所基于的响应修正思想是合理的,新的扰动因子演化方程能够沟通细观实验现象和宏观实验现象,演化方程的提出具有物质基础。

本文把DSC用于岩石材料的应力-应变关系进行描述。归纳总结了理论在分析解决三个典型的岩土工程问题,即排水土,不排水土和岩石问题时采取的具体步骤。在三种典型岩性岩石即红砂岩、大理岩和花岗岩的单轴受压实验中拟合其应力-应变关系曲线。实验采用RMT-150B岩石实验机完成,得到具有稳定软化阶段的曲线。提出直接迭代法代替原有迭代法,方法在描述曲线软化阶段时效果较好。讨论了实验曲线弹性段压密点前后弹性模量的变化对计算结果的影响,改进了描述效果。在大理岩和红砂岩常规三轴受压实验中讨论了扰动因子的参数随着围压变化的情况。应用DSC的平均化思想描述了单轴受压情况下红砂岩体应变的变化规律。详细介绍了单屈服面分级模型WHISS的特点,WHISS系列模型与其它模型比较的优点和模型参数的物理意义。明确了单屈服面分级模型与扰动因子的结合方式。应用WHISS模型和扰动因子相结合,拟合了红砂岩单轴受压实验应力-应变关系和体应变变化曲线。结果表明,充分运用DSC的平均化思想或响应修正思想。可以简洁有效地描述岩石材料的应力-应变关系或体应变变化曲线。

作为DSC在土力学领域中的扩展,本文将DSC引入Biot固结理论,得到土水耦合的联合方程组,在给定边界条件下可以求得任意时刻的位移和孔压。利用修正剑桥模型和扰动因子相结合得到材料有效应力的变化情况。相应的实验路堤沉降计算实例显示,DSC可以取代损伤理论发挥作用。可以得到结论:DSC可以成功引入其它常规理论,需要用到本构模型时,利用DSC的响应修正思想能够取得更为理想的效果。

作为对DSC在土力学领域中的发展,本文讨论了扰动的应力各向异性表述方式,扰动因子以向量形式出现。详述了各向异性扰动状态理论的有限元实现过程,给出漂移修正和物理量初始值确定方案,确定了各向异性扰动因子引入WHISS模型的实现步骤,编写了有限元程序。

轴对称问题算例表明,总是可以选取合适的扰动因子参数,用以精确描述材料的力学响应,WHISS模型的敏感参数的变化引起的相应物理量值的变化也是平缓的。在平面应变问题算例中,实验结果准确有效,物理量变化规律合理。在描述材料的应力、应变、位移变化方面,可以通过调整扰动因子的参数取值,使结果拟合得足够理想。相应的有限元程序源代码利用两种程序设计语言MATLAB和FORTRAN混合编写。文末附录给出三个重要的用于矩阵运算的子例程序源代码。结果表明,运用经过扰动因子概念细化的响应修正思想可以简单有效地描述材料的应力各向异性响应。

本文推导了DSC耦合几何非线性问题的有限元表述。在保守系统内,小应变大位移条件下的本构关系与小应变小位移条件下的本构关系一致,均由WHISS模型与扰动因子结合得到。公式推导结果表明,基于材料的本构不变性原理,DSC可以引入到几何非线性研究领域之中。

3. 学位论文 [李道伟](#) 深埋长大隧洞围岩细观力学试验研究 2008

工程岩体大多处于受压状态。以往对受压状态下岩石破坏过程的研究主要是在宏观尺度内进行的。在外荷载作用下,内部微裂隙的开裂、生长、闭合和贯通直接影响到岩体的稳定性。所以,岩体细观结构的研究,对于了解岩体的力学本质有着重要意义。

本文以锦屏大理岩为研究对象,主要在细观层次上对大理岩的破坏过程进行分析,主要研究内容如下:

(1)对大理岩进行单轴受压SEM实验,得到岩石从加压到破坏过程中各个压力状态下的细观结构图片。然后,对图片进行分析,得到对应于不同压力的岩石微裂隙的长度、方位角、宽度、面积和周长等细观信息。

(2)利用统计学理论,对岩石细观结构数据进行统计分析,研究其在不同压力下的分布概型。然后通过Monte-Carlo模拟,再现微裂隙在各个压力状态下的分布形态。

(3)结合损伤理论和分形理论,对Monte-Carlo模拟结果进行分析,得到岩石损伤变量和分形维数与外荷载之间的关系。并可以看出,损伤变量和分形维数有着相同的变化趋势。在统计损伤力学理论的基础上,得到岩石的本构方程。

4. 期刊论文 [倪晓慧, 朱珍德, 武沂泉, Ni Xiaohui, Zhu Zhende, Wu Yiquan](#) 基于SEM的大理岩单轴受压全过程细观损伤量化研究 -金属矿山2009, ""(9)

设计基于SEM的大理岩细观损伤全程数字化跟踪试验方案,对四川锦屏大理岩试样进行了单轴压缩细观损伤的全程试验。基于数字图像处理技术,对微裂纹的萌生、生长及贯通过程进行定量分析,提取试样在受荷过程中微裂纹的面积、方位角、长度等基本几何数据,然后利用统计学理论对获取到的32组试样微裂纹的损伤全过程的细观信息进行了统计分析,得到在单轴压缩过程中大理岩试样微裂纹的方位角、长度和间距服从变参数的广义极限分布这一结论。

5. 期刊论文 [倪晓慧, 朱珍德, 赵杰, 李道伟, 冯夏庭, NI Xiao-hui, ZHU Zhen-de, ZHAO Jie, LI Dao-wei, FENG Xia-ting](#) 岩石破裂全程数字化细观损伤力学试验研究 -岩土力学2009, 30(11)

设计基于扫描电镜(SEM)的岩石破裂全程数字化细观损伤力学试验方案,实现了岩石破裂全过程的显微与宏观实时的数字化监测、控制、记录及分析的岩石力学试验。应用于四川锦屏大理岩预制微裂纹试样中进行单轴压缩破坏全程的数字化试验,对微裂纹的萌生、生长及贯通过程进行数字化定量分析,得到试样在受荷过程中微裂纹的面积、方位角、长度、宽度和周长基本几何数据,从宏观角度描述了岩石试样单轴压缩过程中的破坏机制,并分析得出试样单轴受压破坏过程中虽然微裂纹在某些区域集中,但在整个试样中微裂纹的统计分布依然是服从某一指数分布的这一结论。试验研究结果证明了该试验方案的科学性和先进性。

