

继续节理岩石破坏过程数值模拟研究

黄梦宏,唐礼忠

(中南大学资源环境与建筑工程学院,湖南长沙 410083)

摘要:采用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D}系统,通过对岩石断续节理在压剪荷载作用下的声发射和位移特性进行数值分析,研究岩石断续节理的破坏过程。研究表明,岩石断续节理破坏过程具有几个不同的阶段,节理的倾角对破坏过程具有明显的影响。

关键词:数值模拟;声发射;岩石断续节理;破坏过程

断续节理是自然岩体中常见的岩石节理。岩体工程围岩中的节理对岩体工程的稳定性起着控制作用。在岩体工程围岩中,岩石节理主要受到压剪荷载的作用,因此,研究压剪荷载作用下岩石断续节理的破坏特性具有重要的理论和实际意义。岩石在发生破坏时会产生声发射,从微观机制看,声发射是岩石材料中微裂纹以及结构面的断裂扩张所释放的弹性应变能,它随着岩石破坏的进行,表现出不同的特征。因此,研究岩石破坏过程中的声发射特征是研究岩石破坏特性的一种有效方法。本文利用岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D}(rock failure process analysis),对含断续节理的石英岩在垂直与水平力双向力作用下的压剪破坏过程的声发射特征和位移特性进行数值分析,研究岩石断续

节理在压剪荷载作用下的破坏特征。

1 数值模型简介

RFPA^{2D}系统是基于有限元应力分析原理开发的岩石材料渐进破裂直至破坏过程的数值模拟软件,其基本思想是:将岩石材料的不均质性参数引入到计算单元,宏观破坏是单元破坏的积累过程;认为单元性质是线弹-脆性的,单元的弹模和强度等其他参数服从某种分布,如正态分布、韦伯分布、均匀分布等;当单元强度满足破坏准则时发生破坏,破坏后的单元比其它未破坏的单元的弹模更低,故可以以连续介质力学方法处理物理非连续介质问题。在模拟声发射时,认为岩石的损伤量、声发射同破坏单元数成正比。

3.4.2 质量管理措施

(1)施工前根据地质条件进行试桩,掌握对该场地的成桩经验及各种施工参数。

(2)所使用的水泥必须符合设计要求,而且必须有水泥出厂合格证及水泥抽检试验报告,严禁使用受潮、变质、结块的水泥。

(3)在施工过程中,严格控制好喷浆的连续性、均匀性及下沉与上升速度和停浆面高度,确保搅拌桩的有效桩长符合设计要求。

(4)定时检查成桩直径及搅拌均匀程度,保证成桩直径和桩身强度符合设计要求。

4 施工效果评述

4.1 质量检测

按照有关规范要求,对已完成的搅拌桩采用了 4 种检验方法,分述如下:

(1)轻便触探检验:主要检验 7 天龄期内桩身强度,共检验了 24 根,触探击数(N_{10})较高,均符合设计要求。

(2)桩身取样强度检验:共取 4 组样,待养护一定时间后送测试单位做抗压试验,试验结果均满足设计要求。

(3)复合地基载荷试验:经质检单位根据《建筑地基基础设计规范》(GBJ7-89)进行检验。共做了 5 个试压点,检测结果均符合设计要求。

(4)现场开挖检验:载荷试验合格后,基坑进行了全面开挖,

其结果是:整体桩位偏差均在规范允许范围内;桩身结构完整,搅拌均匀,桩身强度现场检验均符合设计要求。

4.2 效果评价

从检验结果看,无论是轻便触探,还是桩身取样强度检验,搅拌桩桩身强度较高,均超过了设计所要求的桩身强度;从复合地基载荷试验结果可以看出,经搅拌桩处理后,复合地基承载力有了显著提高,均超过了设计要求的承载力。因此,通过采用浆喷深层搅拌桩对该住宅楼软基进行加固处理后,大大地提高了地基的承载力,加固效果显著。

5 结束语

通过上述工程实例,说明浆喷深层搅拌桩应用于处理低层住宅楼软基在技术上是切实可行的,在经济上是十分合理的。但是在工程应用中,应注意如下几点问题:

(1)水泥用量:施工时水泥掺入比不得少于设计要求。喷浆时,一定要控制好喷浆的均匀性和连续性。

(2)确保桩长达到设计要求。在制浆时,严格实行“下---上,又下---上”四次搅拌四次喷浆的施工工艺,才能保证桩身质量。

(3)成桩速度:严格按照设计要求进行施工,保证均匀搅拌。

参考文献

[1] 江正荣.地基与基础施工手册[M].中国建筑工业出版社,1997,7.

笔者以某实际岩体工程中的石英岩为研究的岩石材料,其力学参数为抗压强度为 237MPa,弹性模量为 65000MPa,摩擦角为 55°,拉压比为 13;岩石节理的力学参数根据工程经验在模型中假设为抗压强度为 105MPa,弹性模量为 15000MPa,摩擦角为 30°,拉压比为 10。分析模型考察一个岩石二维网络系统,网络被划分成 250×100 个等面积正方形单元,尺寸为 125mm×50mm。断续节理的宽度均为 5mm,节理间距为 20mm,节理角(最大主压应力轴与节理面的夹角)分别取 30°、45°、60°^[2]。模拟过程采用荷载加载方式,分别对模拟试样在水平与垂直方向施加载荷,垂直方向荷载分别取:1. 2MPa、2. 4MPa、3. 6MPa、……,每步增加 1. 2MPa;水平方向荷载分别取:0. 2MPa、0. 4MPa、0. 6MPa、……,每步增加 0. 2MPa。加载过程假定岩石与节理的力学性质均服从韦布尔分布,均质度 $m=10$,采用 Mohr—Coulomb 强度准则,模型示意图如图 1 所示。

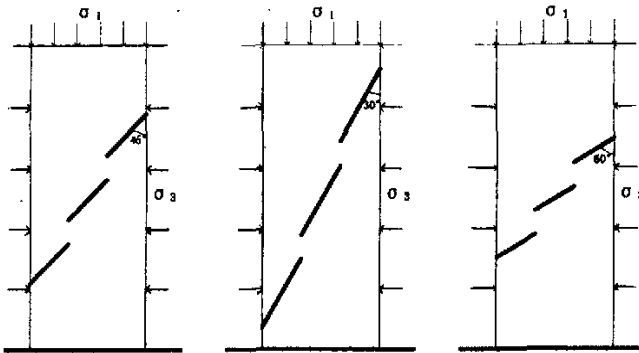


图1 继续节理岩石模型示意图

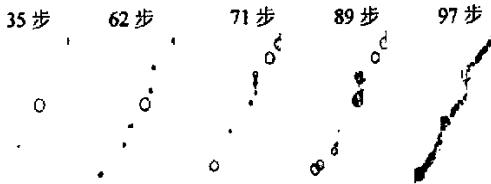
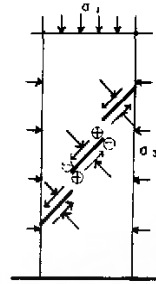


图2 试样2声发射源空间分布

2 数值模拟结果与分析

2.1 模拟试件宏观破坏分析

图 2、图 3 分别为节理面与 σ_1 间的夹角为 45°的试样在不同加载步即变形破坏过程中的声发射源空间分布和节理面的受力分析,可见其变形破坏过程大致可以分为 4 个阶段:(1)起始—第 35 步。试件无声发射产生,由于该阶段施加的载荷远远低于节理的强度,节理面上的剪应力还不足以克服节理面上的摩擦力,试件的应力分布与位移场都比较均匀,试件处于线性阶段;(2)第 36 步—第 62 步。试件开始产生声发射,声发射从试件中部的节理面开始,其产生的位置主要集中在节理面上。由于该阶段双向力继续增加,节理面上的剪应力达到了其抗剪强度,并开始超过节理面的强度,此时,节理面开始产生较微的相对滑动,整个试



⊕表示受拉力作用, ⊙表示受压力作用

图3 节理面受力图

件的应力开始向节理面两端集中,出现应力重新分布。(3)第 63 步—第 88 步。随载荷的进一步增大,节理面位移增加,破坏程度增大,节理面两端由于随着应力集中的作用产生微小裂纹并开始扩展、汇合,这使得节理面端部之间的岩桥开始破坏。从图上可以看出,声发射能量逐渐增大,声发射源除在节理面上外,在节理面两端的岩桥中也产生声发射;(4)第 89 步—第 97 步。声发射源开始向岩桥汇集,但在岩石最终破坏之前,岩桥部分的声发射消失,只在节理面上存在声发射而且其能量减弱。可见,该阶段开始时主要由岩桥承受荷载的作用,随着载荷的增加,裂纹贯穿岩桥,岩桥完全破坏,并完全丧失承载能力,岩桥破坏裂面可能部分发生分离,因而此时声发射大为减少甚至消失,之后形成一个包含节理面和岩桥的宏观贯通的破坏面,其两侧的岩块沿节理面继续滑动并很快导致试体失稳破坏,此时声发射产生于节理面上。

由上述可见,岩石断续节理在双向正交力作用下,其变形破坏过程具有明显的阶段性,岩石首先从试件中部节理面开始破坏,然后其它节理面也开始破坏,最后岩桥断裂,形成贯通的破坏面,最终使岩石破坏;这一过程中产生的声发射能够很好地反映岩石节理的变形破坏过程,其能量大小的改变说明了岩石破坏的程序,其声源的变化说明了岩石的微观结构破坏的发展过程。

3.2 节理角对试件破坏的影响

图 4 为含有与 σ_1 呈不同夹角的断续节理试件在变形破坏过程中的声发射、应变与加载步关系曲线,声发射能量用加载步内声发射能量与整个变形破坏过程中声发射总能量之比来表示。试验模拟了 3 个角度即 30°、45°和 60°的节理在变形破坏过程中声发射。由图 4 可见,节理角为 30°时,在出现最大能量比的声发射之前,岩石的声发射很弱,大能量的声发射出现比较突然,而且占总声发射能量的比例较大,在最大能量的声发射出现后,岩石很快破坏,因此,这种情况下,用声发射来预测岩石的破坏,其破坏前兆不明显;节理角为 45°时,在出现最大能量比的声发射之前,岩石的声发射能量增大,而最大的声发射所占总能量的比例下降;节理角为 60°时,这种变化进一步增强,岩石的声发射能量随变形破坏的加深而逐渐增大,因此,用声发射来预测岩石的破坏时,具有明显的前兆;另外,节理角为 30°、45°和 60°的岩石其破坏荷载是从小到大变化的。

可见,断续节理岩石的变形破坏过程与节理角关系密切,节理角越小,声发射能量越集中,岩石破坏荷载越低,反之,节理角越大,声发射能量则趋于分散,岩石破坏荷载相对越高。

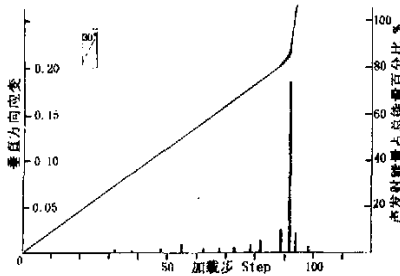


图 4a

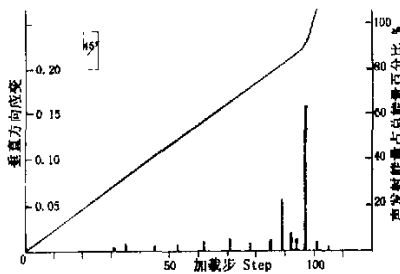


图 4b

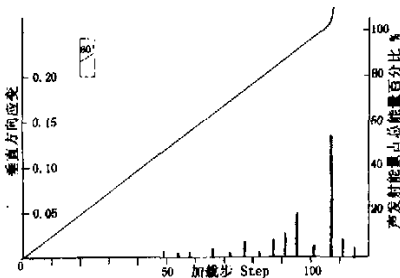


图 4c

图 4 试件声发射、应变与加载步关系曲线

3.3 试件的剪胀效应

显然平直的断续节理面本身的相互错动不会引起明显的剪胀,但图 1 所示的断裂节理面之间有一定错位,由于岩桥断裂破坏形成的破坏面随节理面的相对滑动形成空化从而引岩石产生剪胀。由于岩桥断裂面近垂直方向,因此,可以采用节理面两侧的岩块滑动的水平位移来表示岩石的剪胀。图 5 是节理面两侧的岩块滑动的水平位移与加载步的关系。可见,不同节理角三组模拟试件在双向正交力作用下都产生了不同程度的剪胀效应,并且剪胀效应同节理角的大小具有正相关关系。

4 结论

万方数据

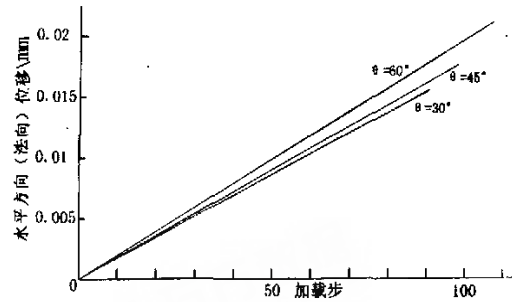


图 5 水平位移与加载步关系曲线

(1)断续节理岩石的变形和破坏过程具有几个明显的不同阶段。随荷载的增加,岩石经历线弹性阶段、节理面错动、节理尖端应力集中和开裂、岩桥应力集中和开裂直到最终失稳破坏的全过程。

(2)声发射特性可以很好地表征断续节理岩石的变形破坏过程,随着节理角增加,岩石破坏的声发射前兆就越明显。

(3)断续节理岩石的破坏过程与节理角关系密切。岩石的剪胀效应随节理角的增大而增大,声发射集中程序则和节理角大小具有负相关关系。

参考文献

- [1] 唐春安. 岩石声发射规律数值模拟初探[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4).
- [2] 潘长良等. 岩爆预测理论与技术研究. 中南大学, 国家九五科技攻关成果报告(编号:96-116-01-01-02)[R].
- [3] 陈忠辉, 谭国焕, 杨文柱. 不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5).
- [4] 陈忠辉, 谭国焕, 杨天鸿, 李连崇. 对称和非对称载荷下声发射的数值模拟研究[J]. 岩石力学, 2001, 22(4).
- [5] 陈忠辉, 唐春安, 傅宇方. 岩石微裂纹损伤演化诱致突变的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(11).

Failure process of intermittent joints rock by means of numerical simulation

HUANG Meng-hong, TANG Li-zhong

(College of Resource & Environment and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The failure process of intermittent joints rock was studied on the basis of numerical simulation of acoustic emission and displacement of intermittent joints in the conditions of compress and shear load with Rock Failure Process Analysis System. The results show that several obvious different stages exist in the failure process of intermittent joints rock, and the rock failure process is obviously influenced by intermittent joints angle.

Key words: numerical simulation; acoustic emissions; rock intermittent joints; failure process

继续节理岩石破坏过程数值模拟研究

作者: [黄梦宏](#), [唐礼忠](#)
 作者单位: [中南大学资源环境与建筑工程学院, 湖南, 长沙, 410083](#)
 刊名: [西部探矿工程](#)
 英文刊名: [WEST-CHINA EXPLORATION ENGINEERING](#)
 年, 卷(期): 2003, 15(4)
 引用次数: 1次

参考文献(5条)

1. [唐春安](#) [岩石声发射规律数值模拟初探](#) 1997(04)
2. [潘长良](#) [岩爆预测理论与技术研究](#). 中南大学, 国家九五科技攻关成果报告(编号:96-116-01-01-02)
3. [陈忠辉](#), [谭国焕](#), [杨文柱](#) [不同围压作用下岩石损伤破坏的数值模拟](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2001(05)
4. [陈忠辉](#), [谭国焕](#), [杨天鸿](#), [李连崇](#) [对称和非对称载荷下声发射的数值模拟研究](#) 2001(04)
5. [陈忠辉](#), [唐春安](#), [傅宇方](#) [岩石微破裂损伤演化诱致突变的数值模拟](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 1998(11)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [李建功](#), [邹银辉](#), [刘红](#), [董国伟](#), [LI Jian-gong](#), [ZOU Yin-hui](#), [LIU Hong](#), [DONG Guo-wei](#) [AE声发射在波导管中传播规律的数值模拟—地下空间与工程学报](#)2008, 4(6)
 利用大型动力学有限元软件ANSYS/LS-DYNA对AE声发射在波导管中的传播进行了数值模拟, 采用了两种不同的模拟方案, 得出了声发射应力波在波导管中传播时受波导管的直径以及长度的影响显现出衰减规律. 分析结果表明, 波导管直径在5mm~40mm范围内对声发射传播影响不大, 直径在20mm左右时加速度幅值较佳. 设计波导管时应尽量使波导管长度大于1m以上, 以保证接收数据的相对稳定. 所得结论对现场试验和进行相关的实验室实验中波导管传感器直径、长度的选择以及安装都具有一定的指导意义.
2. 学位论文 [李冉](#) [混凝土破坏过程声发射的协同学分析及其数值模拟](#) 2007
 混凝土破裂过程中声发射现象能够很好地揭示混凝土破裂机理. 本文利用协同学的基本原理, 对混凝土破裂过程中声发射现象进行了探索性研究, 并通过混凝土破裂过程中内部结构状态变化(损伤演化)和声发射特征的对应关系, 从更深层次上认识混凝土的破裂机理. 首先分析了混凝土声发射参数与损伤演化的关系及如何使用声发射参数来表示损伤演化特征, 并依此为基础, 对混凝土材料声发射同应力、应变之间的耦合关系进行了探讨, 然后以声发射事件计数率作为混凝土破坏过程的序参量, 建立了混凝土声发射序参量的演化方程, 并分析了其科学意义, 对混凝土声发射的协同特征进行了全面描述. 最后, 应用 RFP A-2D 软件对混凝土声发射进行模拟, 应用数值模拟的方法验证了混凝土声发射的协同效应, 从而进一步证实了研究结果的准确性和利用协同学研究混凝土声发射的可行性, 为混凝土声发射技术的工程应用提供理论依据; 同时, 所做的数值模拟工作, 也为混凝土破裂机理研究提供了新的手段, 即数值试验手段.
 应用唐春安教授 RFP A-2D 软件, 通过对混凝土受力破坏过程的声发射数值模拟试验, 研究了混凝土破坏全过程的声发射特征, 包括声发射与时间、声发射与应力水平之间的关系. 混凝土声发射是与其内部微破裂(损伤)的产生直接相关的, 并存在着必然联系. 在数值模拟计算中, 单元的损伤量与混凝土的声发射之间存在正比关系. 研究表明, 混凝土声发射事件率在不同应力水平的变化很大; 混凝土在接近峰值强度时单位时间内的应力增长速度减小、声发射事件率出现明显下降. 模拟试验研究表明, 用声发射参量表达损伤因子而得到的混凝土在单轴应力状态下的损伤演化曲线和应力应变曲线与数值模拟试验所得到的测试数据相一致.
3. 期刊论文 [王善勇](#), [唐春安](#), [徐涛](#), [谭志宏](#) [矿柱岩爆过程声发射的数值模拟—中国有色金属学报](#)2003, 13(3)
 由损伤力学理论与微元强度统计理论, 得到了岩石声发射参数与损伤参量的关系. 应用自行开发的RFP A2D程序对矿柱岩爆的物理过程进行了数值模拟, 其结果再现了矿柱岩石微破裂诱致宏观破裂的演化过程以及和微破裂相关的声发射事件源的空间分布特征和事件序列特征. 特别是考虑到材料非均匀性的影响, 分析了不同粒度材料的模型产生不同岩爆模式的原因. 同时研究了岩爆发生过程“平静期”和“损伤愈合”的特性以及在大的岩爆前有较小的声发射这种前兆出现的规律.
4. 学位论文 [张建辉](#) [电磁声发射数值模拟及实验研究](#) 2006
 电磁声发射技术是近几年发展起来的一种全新的无损检测技术, 可以用来对导电薄板进行损伤检测及评价. 该技术是通过对被测构件的局部施加一个电磁场, 使其产生声发射响应, 从而对缺陷损伤程度及位置进行评价. 因为电磁声发射技术是一种新技术, 故对其产生机理以及应用的理论分析是非常必要的. 由于电磁声发射技术中的非线性问题以及电磁-应力等多场耦合问题十分复杂, 采用传统的解析方法, 难以分析研究电磁声发射技术的机理. 本文建立了电磁声发射的数学模型, 并利用有限元法对不同电流值情况进行数值模拟计算, 完善的说明了其产生机理. 论证了电磁声发射用于无损检测的可行性. 引入超声调制, 证明了其对声发射的增强作用. 最后, 对研究所需的电源进行了初步设计仿真, 还对电磁声发射实验部分进行了设计.
5. 期刊论文 [祝方才](#), [潘长良](#), [曹平](#) [岩石结构对声发射影响的试验研究及数值模拟初探—有色金属\(矿山部分\)](#) 2002, 54(2)
 本文在试验的基础上, 研究了两类岩石材料单轴压缩下的声发射规律, 发现脆性坚硬完整的材料声发射在破坏前会出现突跃; 而松软材料发射平稳增加, 这与其破坏现象是一致的. 数值模拟表明, 岩石的破坏过程与岩石的结构(均质度)存在一定的关系, 模拟加载过程中的声发射规律与试验的结果一致.
6. 学位论文 [李兴伟](#) [工作面冲击地压声发射模式与应用](#) 2004
 本文主要从工作面冲击地压形成机理、工作面煤体受力状态出发建立了冲击地压数值计算模型. 应用RFP A软件对不同顶底板条件, 不同均质度煤体的声发射模式进行了数值模拟, 对工作面煤体声发射进行了分析研究, 将其分为三种类型: 分布型、波动型和持续稳定型. 分析研究了煤层均质度对工作面声发射模式的影响, 应用夹持理论研究了不同均质度煤体在夹持状态下的支撑压力分布形式, 研究了煤体的均质度对支撑压力的影响. 结合灰色建模理论, 建立了声发射参数预测冲击地压的尖点突变模型. 对分布型声发射模式进行了突变分析, 得到了与数值计算相吻合的结果. 最后用突变理论分析了华丰矿3406(1)工作面的地音监测结果, 准确的预测了3月10日的冲击地压危险性, 得到了较好的应用效果.
7. 期刊论文 [赵奎](#), [金解放](#), [刘明松](#), [王晓军](#), [何国强](#), [支学艺](#), [ZHAO Kui](#), [JIN Jiefang](#), [LIU Mingsong](#), [WANG Xiaojun](#), [HE Guoqiang](#), [ZHI Xueyi](#) [岩石点荷载作用下对应力记忆效应的声发射数值模拟与试验研究—岩石力学与工程学报](#)

2009, 28 (z1)

在分析单轴压缩试验岩石Kaiser效应机制的基础上,建立岩石在点荷载作用下对先前应力记忆效应的理论表达式,采用岩石破裂过程分析软件RPPA2D对14种不同尺寸和力学参数的试件进行数值模拟,模拟结果表明,岩石点荷载声发射试验能够反映岩石先前应力状态,点荷载加压出现声发射时的点荷载值与岩石先前所受应力值成正相关关系。为了进一步验证上述结论,对5个岩石试件进行单轴压缩加载、卸载后用点荷载重新加载的循环试验,得到与数值模拟相同的结论,研究成果为工程现场地应力值估算、评价提供新的研究方法。

8. 学位论文 沈毅 压电正交异性复合材料用于AE传感的初步研究 2005

众所周知,声发射(AE)是材料在受到形变或外力作用时,迅速释放能量而产生的瞬态应力波,是进行结构诊断的重要依据。声发射的检测过程可以归纳为:从声发射源发出的应力波信号经介质传播后达到声发射传感器,输出电信号,根据这些电信号对声发射源作出正确的解释,从而达到对结构的损伤检测的目的。声发射信号的频率分量可以从次声频扩展到50MHz,因此需要传感器具有较宽的频带,高的灵敏度才能有效地抓住结构损伤的特征信号。

目前人们一般用压电材料研制传感器,因为压电材料感应应力波时具有响应速度快、频带宽、测量精度高、性能稳定等优点。然而普通压电材料作为传感元件它将同时感受所有方向应力波,不具备测定特定方向应力波的能力[1],因此也不能分辨不同方向的AE信号。

压电正交异性复合材料OPCM(OrthotropicPiezoelectricCompositeMaterials,简称OPCM)传感器除了具有普通压电复合材料柔韧性好、强度高、极限应变大、重量轻等优点外,还具有平面横观各向异性的特点,可以区分平面结构中的各个应力波分量。本文用OPCM研制AE传感元件,通过有限元方法对传感元件的构造方式,尺寸和性能等进行设计和优化,包括(1)研究在有限元中压电元件电极模拟方法,讨论了读取电压自由度值的可行性和优越性;(2)通过数值方法模拟结构中一种特定的AE源评价传感元件的特性,该方法具有简单,无噪声干扰的特点;(3)基于MATLAB的信号处理方法对传感元件模拟输出信号进行分析。

通过设计相关的实验方法对传感元件的正交异性特性进行检测,并把所得信号和数值模拟结果进行分析比较,在验证理论方法可行的基础上,对影响传感元件传感特性的因素作了详细的研究;并同时研究了OPCM传感元件的加工制作工艺。最后对该传感元件的应用前景作了阐述。

9. 期刊论文 涂涛. 杨天鸿. 唐春安. 梁正召 孔隙压力作用下煤岩破裂及声发射特性的数值模拟 岩土力学

2004, 25 (10)

运用嵌入孔隙压力的岩石破裂过程分析RPPA2D系统,对孔隙压力作用下煤岩的变形强度特性进行了数值试验研究。数值试验结果表明,在孔隙压力一定时,随着围压的增加,煤岩的杨氏模量、抗压强度都随之增高;而当围压一定时,随着孔隙压力的增加,煤岩的杨氏模量、抗压强度则稍有降低,而且峰值强度后的应力-应变曲线有呈现脆性的趋势。此外数值模拟还研究了不同围压及孔隙压力作用下煤岩的声发射特性。

10. 学位论文 张勇 基于声发射的采空区煤岩失稳预报研究 2007

煤和岩石等脆性材料在受荷载变形与破坏过程中产生微破裂时伴有声发射(acoustic emission, AE)现象,因此AE技术是用来对材料在受载情况下,对材料内部损伤进行实时检测的一种方法。煤矿采空区内煤岩动态损伤、破裂并演化致失稳过程预报是灾害控制的前提之一。本研究以神东矿区大柳塔煤矿1'<-2>煤6m煤层全厚开采形成的采空区上覆围岩动态破坏与失稳预报问题为研究对象,尝试利用声发射技术,完成了不同加载模式下的煤和岩石破坏过程的声发射特征实验,同时完成了基于声发射的物理相似模拟实验设计及实验,对采空区煤和岩石失稳的声发射特征参数(总事件、能率)与时间演化过程进行对比分析,同时综合分析应力(S-stress)、声发射(AE)和变形(D-deformation)之间蕴涵的物理、力学机制以及煤岩断裂与声发射之间的相关性,借助煤岩介质损伤与失稳的声发射理论定量地分析采空区煤岩介质的孕裂和失稳的规律及前兆。然后采用三维非线性有限差分程序FLAC^{3D}对采空区覆岩宏观运动规律进行了数值模拟,深入分析开采过程中围岩应力和变形规律。研究表明,声发射技术是解决采空区动力失稳预测及诱发灾变预报的有效手段之一,为采空区动力失稳及灾变行为预报提供线索。

引证文献(1条)

1. 刘顺桂. 刘海宁. 王思敬. 胡波. 张晓平 断续节理直剪试验与PFC2D数值模拟分析[期刊论文]-岩石力学与工程学报

2008 (9)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_xbtkgc200304006.aspx

下载时间: 2010年5月27日