

节理分布对岩体破坏影响的数值模拟研究

第六图书馆

为研究含断续节理岩体的宏观破坏过程和特征,采用岩石破裂过程分析RFPA^{2D}系统,分析了断续节理岩体中裂纹的产生、扩展机理与过程.结果表明,当节理倾角从30°,45°到60°时,岩体强度从小到大增加,并且破坏前期的声发射现象增强、变形增大;随着节理密度的增大,裂纹的产生从互不影响到相互抑制,裂纹扩展长度减小;中间节理受压剪作用很快与相邻节理贯通导致节理岩体破坏.据此,明确界定断续节理产生贯通破坏的范围就是围岩破裂区.为研究含断续节理岩体的宏观破坏过程和特征,采用岩石破裂过程分析RFPA^{2D}系统,分析了断续节理岩体中裂纹的产生、扩展机理与过程.结果表明,当节理倾角从30°,45°到60°时,岩体强度从小到大增加,并且破坏前期的声发射现象增强、变形增大;随着节理密度的增大,裂纹的产生从互不影响到相互抑制,裂纹扩展长度减小;中间节理受压剪作用很快与相邻节理贯通导致节理岩体破坏.据此,明确界定断续节理产生贯通破坏的范围就是围岩破裂区.断续节理岩体 破坏过程 数值模拟 围岩破裂区中国矿业大学学报刘刚 赵坚 宋宏伟中国矿业大学建筑工程学院,江苏徐州2210082007第六图书馆

第六图书馆

www.6lib.com

文章编号:1000-1964(2007)01-0017-06

节理分布对岩体破坏影响的数值模拟研究

刘 刚, 赵 坚, 宋宏伟

(中国矿业大学 建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要:为研究含断续节理岩体的宏观破坏过程和特征,采用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,分析了断续节理岩体中裂纹的产生、扩展机理与过程。结果表明,当节理倾角从 30°, 45° 到 60° 时,岩体强度从小到大增加,并且破坏前期的声发射现象增强、变形增大;随着节理密度的增大,裂纹的产生从互不影响到相互抑制,裂纹扩展长度减小;中间节理受压剪作用很快与相邻节理贯通导致节理岩体破坏。据此,明确界定断续节理产生贯通破坏的范围就是围岩破裂区。

关键词: 断续节理岩体; 破坏过程; 数值模拟; 围岩破裂区

中图分类号: TU 94⁺1; TU 94⁺2 **文献标识码:** A

Numerical Simulation on Influence of Joint Distributions on Failures of Rock Mass

LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hong-wei

(School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: To study the failure process and characteristic of rock mass containing intermittent joint, the cracking initiation mechanism and extending process of intermittently jointed rock mass were simulated using software RFPA^{2D}. The results show that the strength of the rock mass increases when the joint angles changed from 30°, 45° to 60°, the deformation increases and the sound emission boosts up in the prophase of the rock failure. The cracking initiation actions change from independence to interaction and the cracking propagation length decreases when the joint density increases. The middle joints quickly connect to the adjacent joints with the action of compression-shear stress, which results in the rock failure. The broken rock zone is the range where the intermittent joints connect.

Key words: intermittently jointed rock mass; cracking process; numerical simulation; broken rock zone.

节理裂隙岩体在物理、力学特征上较一般工程材料具有更显著的随机性、特殊性和复杂性,具有明显的尺度效应,并对岩体的变形和破坏起着控制作用。对它的研究一直受到普遍的重视,也成为岩石力学和岩石工程研究的重要方向^[1-2]。

当今大多数地下工程都建造在节理岩体中。遍

布于岩体中的节理,根据其发育程度以及对岩体强度的控制作用,通常被分为贯通节理和断续节理。当岩体的强度和变形以及破坏形态主要受断续节理组所控制时,则从工程角度将这样的岩体视为断续节理岩体^[3]。断续节理岩体中裂纹的形成、扩展和贯通对岩体的变形和强度特性产生显著的影响,

收稿日期: 2006-04-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412701, 2002CB412703)

作者简介: 刘 刚(1969-),男,陕西省兴平市人,副教授,工学博士,从事岩石力学及地下工程稳定性方面的研究工作。

E-mail: liugangcumt@163.com Tel: 0516-83995992

可以导致岩体劣化,直至破坏.因此,研究断续节理岩体中裂纹的形成、扩展和贯通是岩土工程所面临的重大工程问题^[4].

岩石材料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^[5].因此,研究节理岩体破坏过程中的声发射特征是研究岩体破坏特性的一种有效方法.本文利用岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统,对含断续节理的岩体在单向压缩条件下的破坏特征和声发射特征进行数值分析,研究节理岩体中裂纹的产生、扩展机理与过程,重点研究节理角度和密度对断续节理岩体破坏过程的影响.

1 数值模型及控制条件

RFPA^{2D} 系统是一个分析岩石渐进破裂直至宏观破坏过程的程序,其基本原理已有多处介绍^[6-12],本文不再赘述.其基本思想是:通过考虑微观单元力学参数(弹性模量、强度等)的非均匀性,模拟岩石宏观变形、破坏的非线性行为;通过考虑材料破坏后单元的参数弱化(包括刚度退化),模拟材料破坏的非连续和不可逆行为.该系统自开发以来已应用于非均匀岩石破裂过程及其声发射特性

问题^[8-10],以及脆性非均匀材料中的裂纹扩展等问题^[11-12],与实验结果表现出较好的一致性.

1.1 岩体参数

本文主要研究断续节理的角度和密度对节理岩体宏观破坏过程及破坏特征的影响.因此,所有模型均不考虑岩体均质度 m ^[8] 的影响,作为均质岩体考虑,即 $m=100$.为具有普遍性,取岩石材料的单轴抗压强度为 100 MPa,弹性模量为 25 GPa.岩体中断续节理的力学参数根据工程经验在模型中取远小于岩石材料的参数.模型材料的力学参数见表 1.

表 1 模拟岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model						
参数	单轴抗压强度 / MPa	弹性模量 / GPa	压、拉强度比	泊松比	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
砂岩	100	25	10	0.25	1.2	40
节理	5	5	100	0.25	—	30

1.2 节理倾角与密度

为了研究节理角度的影响,设节理长度为 $a=20$ mm,取节理垂直间距(排距, h)和水平间距(连续度, c)均为节理长度的一半($h=c=0.5a=10$ mm).本文定义节理倾向与压应力(最大主应力)方向之间的夹角分别取为 30° , 45° 和 60° ,共 3 个模型进行数值计算,见表 2.

表 2 节理分布模型

Table 2 Models with different joint distributions

节理参数	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
节理分布模式							
节理分布参数	$\beta=30^\circ$ $c=h=0.5a$	$\beta=45^\circ$ $c=h=0.5a$	$\beta=60^\circ$ $c=h=0.5a$	$c=h=a$	$c=0$ $h=0.5a$	$c=h=0.33a$	$c=0.66a$ $h=0.5a$

注: S4、S5、S6 及 S7 的节理角度 $\beta=45^\circ$

单位岩体中节理的数量称为节理密度.节理密度的表示方法很多,例如单位长度、面积或体积岩体中节理的数目,岩体中节理面间距数值等.本文采用平面二维(100 mm×50 mm)模型,以模型内所含节理的数量代表节理密度,而且仅考虑一组节理,为具有普遍性,取节理角度为 45° .为消除不同试样差别对模拟所造成的影响,固定其他模型参数,所设计的 4 个节理密度模型如表 2 所示.

1.3 数值模型与控制条件

综合以上模型设计,研究模型采用一个岩体二维网络系统,被划分成 $200 \times 100 = 20\,000$ 个等面

积正方形单元,模拟试样的尺寸为 100 mm×50 mm.采用平面应变分析,模拟过程采用位移加载控制方式.对模拟试样施加垂直方向位移来模拟单轴压缩条件.对于每一给定的位移增量,首先进行应力计算,然后根据破坏准则来检查模型中是否有破坏单元.如果没有,继续增加一个位移增量,进行下一步应力计算;如果有单元破坏,则根据单元的拉或剪破坏状态进行刚度退化处理,然后重新进行当前步的应力计算.重复上述过程,直至这个模型试样产生宏观破坏.位移增量每计算步取 0.001 mm,每个模型计算为 150 步.

计算过程采用修正的库仑强度准则^[13], 据此, 模型单元的破坏可以是拉破坏, 也可以是剪破坏。

2 模拟结果分析

2.1 节理倾角对岩体破坏的影响

在岩石破坏之前, 随着加载的进行, 岩石试件会有持续的声发射, 但声发射的次数以及破坏瞬时

的声发射次数占累计次数的比例却随节理倾角的不同, 有明显区别。由于模型单元的破坏是脆性破坏, 因此可将单元破坏所释放的弹性能看成是声发射所释放的能量。图1为不同倾角的试样在变形破坏过程中的声发射累计次数与加载步的关系曲线, 图2为不同倾角试样的荷载与加载方向变形的关系曲线。

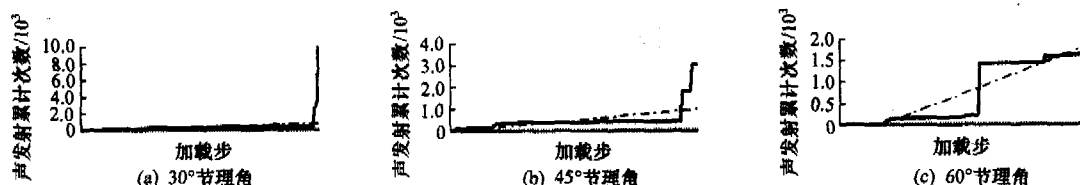


图1 声发射累计次数与加载步关系

Fig. 1 Relations of acoustic emission(AE) accumulated counts and load step

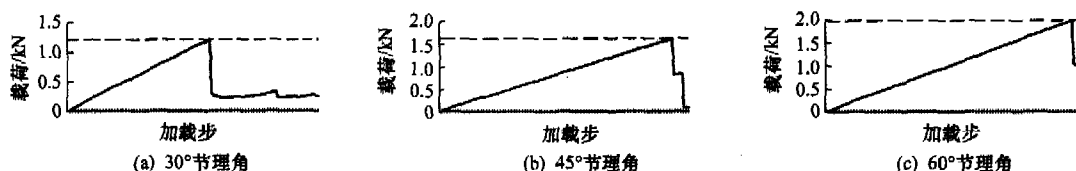


图2 荷载与变形关系

Fig. 2 Relations of load and deformation

由图1可见, 节理倾角为30°时, 在岩石出现破坏时的大量瞬时声发射之前, 岩石的声发射很弱, 累计的声发射也很少, 大量的声发射出现比较突然, 而且占总声发射能量的比例很大, 在最大能量的声发射出现后, 岩石很快破坏, 岩石呈典型的崩溃性的脆性破坏, 岩石的声发射累计次数也远大于其他2种情况。因此, 在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^[5]。当节理角为45°时, 在出现最大能量比的声发射之前, 随着荷载的增加, 岩石有持续的、阶段性的声发射, 说明岩石内部已累积了大量损伤, 岩石破坏时的声发射次数占整个加载过程的声发射累计次数的比例大大降低, 岩石破坏主要是由于破坏前大量损伤累积的结果。当节理角为60°时, 这种变化更加明显, 岩石的声发射能量随变形破坏的加重而逐渐增大, 在岩石发生完全破坏前, 已有明显的声发射急剧增大现象, 表明岩石将要完全破坏而失去承载能力。因此在这种情况下, 用声发射来预测岩石工程的破坏时, 具有明显的前兆, 在工程失稳之前, 当岩体中出现阶段性的声发射急剧增大现象时, 必须采取措施对工程进行加固。

图2很好地表达了岩石试件的荷载-位移曲线与累计声发射之间的关系。2条曲线的对比表明, 对于累计声发射的每一个较大的增幅, 荷载-位移

曲线则对应一个较大的应力降。当节理倾角从30°, 45°到60°呈增加时, 岩石的破坏荷载也是从小到大的增加的, 即岩石的强度增大。这是由于当节理角从30°, 45°到60°变化时, 岩石逐渐从拉破坏转变为压破坏, 岩石抵抗外载的能力逐步加强所致。从荷载-位移曲线看出, $\beta = 45^\circ$ 和 60° 的岩石试件都经历了较大的变形才最终破裂, 岩石试件在整个加载破裂过程中表现出强烈的非线性, 经历了多次应力降才最终破坏, 而 $\beta = 30^\circ$ 的岩石试件的线性增强, 经历了很小的变形就发生了破坏, 表现出很强的脆性破坏。

上述结论与岩石力学^[14]中单结构面岩体的单轴压缩强度基本一致, 并且当结构面倾角继续增大到 $\beta = 90^\circ$ 时, 岩体强度与结构面无关, 此时岩体强度就是岩石的强度; 而 $\beta = 0^\circ$ 时, 岩体将因结构面的横向扩张而破坏。

2.2 节理密度对岩体破坏的影响

1) 节理密度对裂纹产生与扩展的影响

模拟计算了4种节理密度条件下节理岩体的破坏过程。图3表示模拟试样在单轴压缩过程中, 节理尖端裂纹的起裂与裂纹贯通时的声发射图。在声发射图中, 黑颜色代表所有计算步的累积声发射, 圆圈的大小代表了声发射的能量大小。

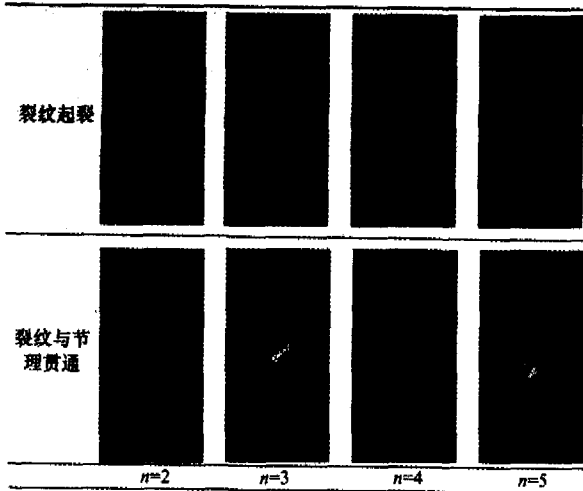


图 3 裂纹起裂与贯通时的声发射

Fig. 3 AE locations when the crack initiating and coalescing

如图 3, 当节理密度 $n=2$ 时, 裂纹主要以翼形裂纹的方式扩展, 即在原生节理两端形成分支裂纹, 裂纹扩展的起始角度大致与压应力成 $0^\circ \sim 10^\circ$ 的角度, 随后分支裂纹弯曲并逐渐与压应力方向平行^[15]. 此时, 由于是拉应力场占主导地位, 所以裂纹主要是在拉应力的作用下扩展, 裂纹的扩展模式主要为拉模式. 由于节理间距很大, 2 条节理所产生的翼形裂纹分别沿压应力方向扩展, 直至贯穿整个试样, 而原生节理与翼形裂纹之间不会产生贯通破坏.

随着节理密度的增加, 2 条外侧节理在拉应力作用下产生翼形裂纹并沿压应力方向扩展. 由于节理之间的相互作用, 两外侧节理之间岩桥部分的应力场由拉应力场为主逐渐过渡为压应力场为主, 即内侧节理在较高压应力的作用下而发生压剪破坏, 其尖端裂纹的扩展受到压应力场的抑制, 在破坏形式上表现为内侧节理不产生尖端裂纹, 整个试件的破坏是沿着外侧节理的翼形裂纹方向与内侧节理贯穿. 此外, 随着节理密度的增加, 裂纹扩展的起始角度逐渐增加, 由大致与压应力平行的方向逐渐变化为与节理垂直的方向.

2) 节理密度对节理岩体强度的影响

文献[16]应用断裂力学, 推导了单向应力作用下次生裂纹的扩展长度, 考虑了节理之间的相互作用, 引入相互作用因子 F_1 , 则次生裂纹的扩展长度 l 为

$$l = \frac{6.073T^2}{\pi K_{IC}^2} F_1^2, \quad (1)$$

式中: F_1 为节理之间相互作用因子; K_{IC} 为临界应力强度因子; T 为张开型 (I 型) 裂纹的受力.

$$T = aF_n \sin \beta,$$

$$F_n = |\sigma_1 \sin \beta \cos \beta| - f_j \sigma_n - C_j,$$

式中: $\sigma_n = \sigma_1 \sin^2 \beta$, 规定压应力为正, 拉应力为负; F_n 为节理表面力; σ_n 为节理法向受力; f_j, C_j 分别为节理面的摩擦系数和黏聚力.

从表 2 看出, 节理密度的增加, 实际上是节理间距 h 的减小, 而节理扩展的极限长度

$$l_m \leq \frac{h}{\sin \beta}. \quad (2)$$

由式(2)可知, 在节理倾角不变情况下, 节理密度的增加实际上是翼形裂纹的极限扩展长度降低, 因此节理岩体在较低的压应力作用下即可产生贯通破坏, 导致承载能力降低. 图 4 为不同节理密度 ($n=2, 3, 4$ 和 5) 时, 节理岩体的初裂荷载、贯通荷载以及模拟试件的极限荷载.

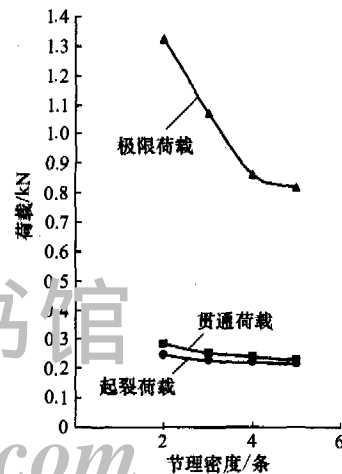


图 4 节理岩体的数值模拟强度

Fig. 4 Numerical simulation strength of joint rock mass

从图 4 可见, 随着节理密度的增加, 岩体的极限强度降低很多, 特别是当节理条数从 2 条增加到 4 条时, 岩体强度下降了 34.8%, 但当节理从 4 条增加到 5 条时, 岩体强度却仅下降了 5.1%. 从曲线的趋势看, 节理密度再增加对岩体强度的降低将进一步趋缓, 岩体强度将趋于稳定, 也即在其他条件相同的情况下, 岩体内节理数量愈多, 密度愈大, 岩体强度愈低, 这与文献[17]中所述的完全一致.

3) 节理密度对起裂荷载和贯通荷载的影响

相对于节理密度对岩体极限强度影响的大小而言, 节理密度对节理的起裂及贯通荷载影响较小. 当节理密度从 2 增加到 5 时, 起裂荷载仅下降了 13.3%, 贯通荷载下降了 19.1%. 从曲线的趋势看, 类似于极限荷载, 即节理密度的增加对起裂荷载和贯通荷载的影响将进一步降低, 节理的起裂荷载与贯通荷载将趋于稳定. 虽然如此, 节理密度对贯通荷载的影响还是大于对起裂荷载的影响.

通过以上研究可知, 在节理岩体地下工程中,

岩体的破坏实际上是原有节理面的张开、错动,导致产生次生裂纹,次生裂纹与原生节理相互贯通而产生纵横交错的贯通裂隙,围岩中产生一定范围的围岩破裂区^[18],导致岩体更大的变形,承载能力降低所致。如果次生裂纹的扩展长度不能达到其极限扩展长度,则可认为没有围岩破裂区。因此,断续节理贯通破坏的边界,即可定义为围岩破裂区的边界,处于围岩破裂区内的岩体为原生节理与次生裂纹相互贯通、岩体被贯通裂隙所切割,导致承载能力降低,处于残余强度阶段。如果相邻节理的次生裂纹没有贯通,可以认为岩体仍具有较高的强度,但已进入极限状态,虽然仍可以承受较高的荷载,但会很快破坏。由于巷道所处的岩层绝大部分被断续节理所切割,我们将断续节理贯通破坏的边界定义为围岩破裂区的边界,具有普遍性和一般性。

3 结 论

1) 如果在翼形裂纹扩展路径上没有其它节理存在,随着应力的增大,翼形裂纹将一直沿压应力方向扩展,否则会与相邻节理贯通,产生裂纹—节理—裂纹—节理……的贯通破坏面;如果应力不增大,裂纹扩展即停止。

2) 当节理倾角(节理倾向与压应力方向夹角)从 30° 、 45° 到 60° 增加时,岩体强度从小到大增加,并且破坏前期的声发射现象增强、变形增大,非线性增强。当节理倾角较大时,用声发射来预测岩石工程的破坏时,具有明显的前兆,在工程失稳之前,当岩体中出现阶段性的声发射急剧增大现象时,必须采取措施对工程进行加固。

3) 随着节理密度的增加,2条外侧节理在侧向拉应力作用下两端产生翼形裂纹并沿压应力方向扩展;由于节理的相互作用,内侧节理在较高压应力的作用下而发生压剪破坏,其尖端裂纹的扩展受到压应力场的抑制,在破坏形式上表现为内侧节理不产生尖端裂纹,整个试件的破坏是沿着外侧节理翼形裂纹方向与内侧节理贯穿。

4) 随着节理密度的增加,岩体极限强度降低很多,但岩体强度不会无限降低,当节理密度增加到一定程度后,岩体强度将趋于稳定。相对于节理密度对极限强度影响的大小而言,节理密度对裂纹的起裂及贯通荷载影响较小。

5) 当节理两端的翼形裂纹扩展长度达到或超过极限长度时,节理岩体将产生贯通破坏。断续节理贯通破坏的边界,可定义为围岩破裂区的边界。处于围岩破裂区内的岩体为原生节理与次生裂纹

相互贯通、岩体被贯通裂隙所切割,导致承载能力降低。

参考文献:

- [1] HOEK E, BROWN E T. 岩石地下工程[M]. 连志升,田良灿,王维德,译. 北京:冶金工业出版社,1986:160-168.
- [2] 李 宁,程国栋,谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报,2001,23(3):268-272.
LI Ning, CHENG Guo-dong, XIE Ding-yi. Geomechanics development in civil construction in western China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268-272.
- [3] 刘东燕,叶晓明,朱 凡. 断续节理岩体强度评价及承载力预测[J]. 重庆建筑大学学报,1997,19(2):21-30.
LIU Dong-yan, YE Xiao-ming, ZHU Fan. The ultimate strength evaluation of rock mass containing intermittent joints[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1997, 19(2): 21-30.
- [4] 周小平,王建华,哈秋龄. 压剪应力作用下断续节理岩体的破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(9):1437-1440.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua, HA Qiu-ling. Failure analysis of intermittent jointed rocks under compression-shear stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1437-1440.
- [5] 黄梦宏,唐礼忠. 断续节理岩石破坏过程数值模拟研究[J]. 贵州工业大学学报,2002,31(5):12-15.
HUANG Meng-hong, TANG Li-zhong. Study on the failure process of intermittent joints rock by means of numerical simulation [J]. Journal of Guizhou University of Technology, 2002, 31(5): 12-15.
- [6] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 长春:吉林大学出版社,2002:11-30.
- [7] 朱万成,唐春安. 混凝土损伤与断裂:数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003:24-43.
- [8] TANG C A, YANG W T, FU Y F, et al. A new approach to numerical method of modeling geological processes and rock engineering problems[J]. Engineering Geology, 1998, 49(3/4):207-214.
- [9] TANG C A, KAISER P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release in unstable failure of brittle rock; Part I, Fundamentals [J]. International Journal of Rock, Mechanics and Mining Science, 1998, 35(2): 113-121.
- [10] 唐春安. 岩石声发射规律的数值模拟初探[J]. 岩石

- 力学与工程学报, 1997, 16(4): 368-374.
- TANG Chun-an. Numeric simulation of acoustic emission in rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16 (4) : 368-374.
- [11] 唐春安,傅宇方,朱万成. 界面性质对颗粒增强复合材料破坏模式影响的数值模拟分析[J]. 复合材料学报, 1999,16(4): 112-120.
- TANG Chun-an, FU Yu-fang, ZHU Wan-cheng. Numerical approach to effect of interface properties on failure modes in particle filled composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16 (4) : 112-120.
- [12] 朱万成,唐春安. 岩板中混合裂纹扩展过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2):231-234.
- ZHU Wan-cheng, TANG Chun-an. Numerical simulation on the propagation processes of mixed mode cracks in rock plates [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000,22(2): 231-234.
- [13] 唐春安,于广明,刘红元,等. 采动岩体破裂与岩层移动数值试验[M]. 长春:吉林大学出版社, 2003: 20-37.
- [14] 蔡美峰,何满潮,刘东燕,等. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002: 104-108.
- [15] 徐涛,唐春安,王善勇,等. 裂纹连续度对非均质材料中雁行裂纹扩展的影响[J]. 东北大学学报, 2004, 25(2):167-170.
- XU Tao, TANG Chun-an, WANG Shan-yong, et al. Influence of crack continuity on propagation of en echelon cracks in heterogeneous materials [J]. Journal of Northeastern University, 2004, 25 (2) : 167-170.
- [16] 朱维申,李术才,陈卫忠. 节理岩体破坏机理和锚固效应及工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2002: 73-75.
- [17] 肖树芳,杨淑碧. 岩体力学[M]. 北京:地质出版社, 1987: 49-59.
- [18] 宋宏伟,贾颖绚,段艳燕. 开挖中的围岩破裂性质与支护对象研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35 (2): 192-196.
- SONG Hong-wei, JIA Ying-xuan, DUAN Yan-yan. Study on characteristic of rock broken by excavation and roof supporting object[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35 (2) : 192-196.

第六图书馆

(责任编辑 王继红)

www.6lib.com