

深埋隧道围岩损伤破坏模式的数值试验研究

康 勇^{1,2}, 李晓红¹, 杨春和²

(1. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 深部岩体具有内禀特性。在开挖过程中, 由于应力重分布导致围岩损伤破坏, 传统岩体力学未能有效揭示其破坏机制。随着细观损伤岩体力学的发展, 采用损伤观点解决深埋隧道围岩破坏问题逐渐显示出其优越性, 但目前仅在均质性假设的基础上对应力状态和破坏判据进行研究, 缺乏对其破坏全过程的相关研究。采用 RFPA^{2D} 软件对通渝隧道二叠系栖霞组岩性为石灰岩且埋深超过 1 000 m 的 K22+029 断面在开挖过程中围岩的渐进破坏过程进行模拟, 使用 EMS-2 型工程多波地震仪实测围岩破坏前、后波速的变化, 定量模拟计算围岩损伤度的变化, 揭示深埋隧道围岩破坏过程的损伤演化特性及损伤破裂过程中声发射、剪应力及岩体纵波波速等因素的变化特性, 得出深埋硬岩隧道以拉剪型破坏为主, 围岩破坏顺序依次为拱顶开裂→左、右拱肩裂纹扩展→左、右拱肩围岩深部裂纹; 损伤过程中声发射事件数与围岩损伤程度近似成正比关系; 损伤围岩表现出明显的非线性特性和损伤局部化特征。所得结论对于隧道施工支护具有指导意义, 也为揭示深埋隧道围岩破坏机制进行有益的尝试。

关键词: 隧道工程; 深埋隧道; 围岩破坏模式; 细观损伤力学

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)增 1-3578-06

RESEARCH ON NUMERICAL TESTS ON DAMAGE-FAILURE MODE OF SURROUNDING ROCK IN DEEP-BURIED TUNNEL

KANG Yong^{1,2}, LI Xiaohong¹, YANG Chunhe²

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Hazard Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Because of complex tectonic boundary condition and high stress environment in deep rock mass, surrounding rock has intrinsic characteristics, which will damage caused by stress redistribution in excavation of deep-buried tunnel. The traditional rock mechanics has been always focused on the stress state and failure criteria under the hypothesis of rock homogeneous, the total rock mass failure process is not considered yet. With the development of meso-damage rock mechanics, the method of damage mechanics has been proved to be better than the traditional theories. But relevant researches are not available at present. Based on the numerical test on damage property of tunnel surrounding rock in an excavation section K22+029 by using the software RFPA^{2D}(two-dimensional rock failure process analysis system), which was developed according to meso-damage mechanics of rock mass, the total failure process of surrounding rock in deep-buried tunnel is simulated, the failure mode, acoustic emission(AE) map and shear strength map in the failure process are shown quantitatively; and the damage index is also achieved by velocity test with EMS-2 engineering multi-poly seismic system. It is found

收稿日期: 2007-04-18; **修回日期:** 2007-05-28

基金项目: 国家创新研究群体基金项目(50621403); 国家自然科学基金重点项目(50334060)

作者简介: 康 勇(1978-), 男, 2001年毕业于重庆大学资源及环境科学学院采矿工程专业, 现为讲师、中国科学院武汉岩土力学研究所站博士后, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: kycn@vip.163.com

that the hard rock mass in deep-buried tunnel is fractured firstly at the roof, then at the spandrel; and finally the fracture extends to the deep layer. Damaged surrounding rock shows obvious characteristics of nonlinearity and localization. The possible failure mode and the relationship between AE amounts and damage variable of surrounding rock in deep-buried tunnel can be obtained from the analysis by using meso-damage mechanics. It is shown from in-situ test results by engineering multi-poly seismic system that the attenuation of longitudinal wave accords with the change of damage variable in tunnel surrounding rock. The conclusions have great application values for tunnel construction and supports. What's more, these are also beneficial tries for the study on failure mechanism of deep rock mass.

Key words: tunnelling engineering; deep-buried tunnel; failure mode of surrounding rock; meso-damage mechanics

1 引 言

深部岩体具有内禀特性, 其宏观特性主要取决于原始的岩体构造边界条件和应力状态。由于深部岩体的构造单元处于高地应力环境中, 其界面处具有黏结和摩擦特性, 又具有能量源和能量汇的特性, 随着埋深的增加, 岩体破坏机制由浅部的脆性能或断裂韧度控制的破坏转化为深部环境下由侧向应力控制的断裂生长破坏, 实际上就是由浅部的动态破坏转化为深部的准静态破坏, 以及由浅部的脆性力学响应转化为深部潜在的延性力学响应。王明洋等^[1, 2]研究了深部岩体工程响应的特征, 根据围岩的分区破裂机制, 对深部工程进行了定义。蒋斌松等^[3]针对深部圆形巷道破裂围岩进行了弹塑性分析, 认为围岩破裂区的出现极其明显地使围岩应力产生重分布, 应力峰值向围岩深部转移, 深部围岩产生膨胀带和压缩带, 出现破裂区和未破裂区交替出现的区域破裂现象。何满潮等^[4]认为, 在深部岩体所属的非线性力学系统中, 传统的理论、方法与技术大部分已失效, 深入进行深部岩体的基础理论研究势在必行。同时, 在深埋隧道开挖过程中, 围岩应力重分布导致围岩损伤扰动带的产生, 对隧道的设计与施工、围岩稳定性分析具有重要影响^[5~9]。

在岩体稳定性分析中, 研究岩体的破坏过程是预报岩体的失稳破坏、选择最佳围岩支护时间最基本的工作之一。深部岩体除了成岩时期和地质改造时期形成的缺陷外, 还由于其长期处于自重应力和地质构造应力的作用下, 构造运动或者工程扰动使得大部分岩体长期处于不利的偏应力状态, 这些不利因素虽然不能使岩石破坏, 却能给隐性裂纹的生成提供条件, 故研究深部岩体微裂纹及其对岩体力学行为的影响, 对解释深部岩体力学的特征具有重

要意义。国内许多学者^[10~12]基于轴向加载下含裂隙类岩石材料模型试验, 对裂隙扩展、贯通过程也进行了不同方面的研究, 揭示了含裂隙试样呈现局部化渐进破裂的细观特征。

但是, 目前的相关研究大多仍然停留在均质性假设的基础上, 且仅仅对应力状态及破坏判据进行了探讨, 较为普遍的方法是将岩石宏观力学试验和相关强度理论分析相结合, 在获得岩石力学参数和本构关系曲线后, 通过试样的位移量和声发射事件数来分析岩石的破坏过程。显然用该方法所获得的结论是间接的、推断性的, 对涉及岩石破坏机制的关键性问题, 如破裂最初孕育的位置、已有源破裂的扩展等, 都知之甚少, 很少涉及岩石自身非均匀性引起的应力分布非均匀性和由此诱发的局部破坏, 对失稳破裂过程研究则更少, 故难以分析岩体破裂演化过程及破坏规律^[13, 14]。

由于岩石细观力学可以描述受力岩石从细观损伤到宏观破坏的本质特征, 从而解决了目前宏观连续损伤力学和基于损伤基元的细观损伤力学方法所面临的难题, 故本文拟采用基于岩石细观力学的数值试验来定量研究细观尺度下深埋隧道围岩破裂演化过程及破坏模式, 进而探讨深部岩体的失稳机制。

2 深埋隧道围岩破坏的损伤力学机制

岩石是一种典型的含有缺陷的准脆性材料, 具有高抗压、低抗拉、低抗剪的特性, 其破坏过程实质上就是微裂纹产生、扩展及贯通的过程。由于长期的地质作用和构造运动, 在岩石的某一部位会形成应力集中, 造成含有缺陷的岩石中储藏有一定的弹性能, 岩石呈现非连续、非均匀、各向异性和非弹性等特征的根本原因是因为其中存在着各种各样的微观缺陷^[15]。深埋隧道围岩变形的产生、发展直

至最终的破坏，是一个非线性的逐渐的演化过程，几乎所有隧道围岩的失稳都不是由于加载产生的，而是由于开挖过程中产生卸荷作用，原有应力场被破坏，若产生的拉应力超过了岩体的抗拉强度，岩体中的损伤裂缝不断扩展、贯通，连通率逐渐增大，岩体质量不断劣化，抗拉强度逐渐减小直至完全消失，岩体产生弹性变形和裂缝变形，引起围岩的局部破坏到整体失稳。岩体的波速与裂隙密度、岩体力学性质(损伤因子)有着密切的关系。岩体损伤与波速存在如下近似关系^[7]：

$$D = 1 - \frac{\bar{V}_p^2}{V_p^2} \quad (1)$$

式中： D 为岩体损伤变量，为量纲一的量； \bar{V}_p 为损伤岩体平均纵波波速(m/s)； V_p 为完整岩体纵波波速(m/s)。

深埋隧道围岩失稳一般经历如下演变过程^[16]：

(1) 隧道开挖前，围岩体中因地质运动或人类活动而赋存大量以断续的非贯通节理裂隙为主的分布缺陷，即“初始损伤”；

(2) 隧道开挖过程中，地应力释放，应力进行重分布，引起某些方向的裂纹开裂、扩展，岩体中的损伤裂隙在二次应力的作用下，有的闭合，有的加速开裂、扩张，使得隧道围岩变形增大、强度降低；

(3) 围岩变形的增长使扩展裂纹逐步发展，岩体损伤逐渐积累并派生新的拉张或剪切裂隙，部分初始裂隙相互连接，进而贯通使得围岩溃曲；

(4) 随着损伤裂隙的进一步扩张、连接、贯通以及力学性能的降低，岩体被切割成不稳定块体而丧失承载力，隧道围岩局部破坏直至整体失稳。

由此可见，深埋隧道围岩破坏实质就是岩体在卸荷条件下其损伤随时间逐步发展的渐进破坏，这一过程取决于工程开挖效应、岩体工程地质水文地质条件恶化及应力状态变化引起的损伤累积和断裂发展的时间效应。研究结果^[17]表明，该过程中裂纹产生的模式有3种：孔洞周边拉应力集中区初始裂纹(primary cracks)、在孔洞周边较远的区域形成的远场拉裂纹(remote cracks)、在孔洞周边的压应力集中区形成的剪切裂纹(shear cracks)。马蹄形隧道围岩破坏的3种裂纹形式如图1所示。

3 深埋隧道围岩损伤破坏数值试验

3.1 RFPA^{2D}简介

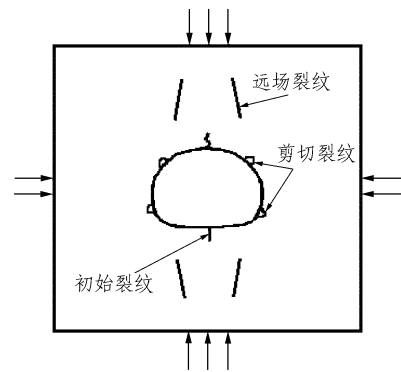


图1 马蹄形隧道围岩破坏的3种裂纹形式

Fig.1 Three kinds of crack modes of surrounding rock failure in U-shaped tunnel

针对岩土类材料的非线性、非均质性和不连续性，唐春安等开发了 RFPA^{2D}(rock failure process analysis)软件，采用连续介质力学方法处理物理非连续介质问题，可以模拟研究岩石(体)开挖破裂过程中的损伤局部化及其演化过程^[18, 19]。

3.2 模型的建立

本模型用于模拟通渝隧道超过 1 000 m 埋深地段(K22+029 断面，石灰岩)围岩渐进破坏模式。

网格划分：网格划分为 100×100 的正方形网格单元，实际的高度、宽度均定为 20 m，单元服从 Weibull 分布，材料均质度分别取 3(弹性模量、强度)和 80(泊松比、自重)，通渝隧道 K22+029 断面岩体参数平均值见表 1。

表 1 通渝隧道 K22+029 断面岩体参数平均值

Table 1 Average values of rock mass parameters at section K22+029 of Tongyu tunnel

弹性模量/GPa	强度/MPa	泊松比	容重/(N·mm ⁻³)
49	28.4	0.21	2.66×10 ⁻⁵

强度准则：摩擦角为 38.1°，拉压比为 10，残留强度百分比为 0.1，破坏后泊松比系数为 1.2%，强度准则为 Mohr-Coulomb 准则，最大拉应变和压应变系数分别为 1.5 和 200。

边界条件：加载方向为 Y 方向，无约束，加载位移为 2 mm，地应力参数来自通渝隧道地质勘察资料中水力压裂试验结果，即：最大水平主应力为 34.45 MPa，最小水平主应力为 21.68 MPa。

控制信息：求解的类型为平面应变问题，加载总步数 100 步，重力方向选择自重控制，不显示步中步，隧道分 4 步开挖。

3.3 试验结果及其分析

图 2 为荷载与加载步关系曲线, 图 3 为声发射次数与加载步关系曲线, 图 4 为第 1~4, 18, 21, 31, 61 步的声发射图, 图 5 为第 1~4, 18, 21, 31, 61 步的剪应力图。

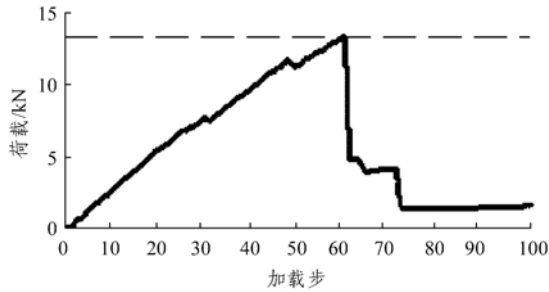


图 2 荷载与加载步关系曲线

Fig.2 Relation curve of load versus loading step

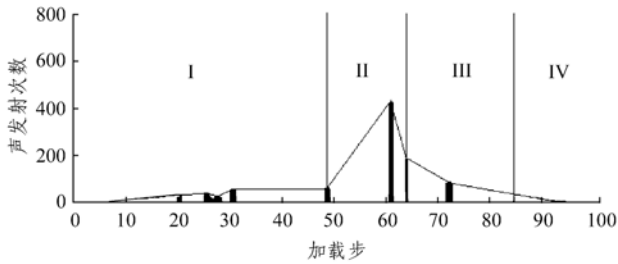


图 3 声发射次数与加载步关系曲线

Fig.3 Relation curve of AE amount versus loading step

图 2~4 表明, 随着荷载的增加, 隧道围岩首先在拱顶处产生裂缝, 有少量的声发射发生, 之后隧道底板开始破裂, 声发射现象逐渐增多。当加载至第 61 步时, 隧道围岩大面积屈服破坏, 此时声发射

数急剧增加, 由图 3 可看出声发射数为 415, 说明声发射数目与隧道围岩的损伤程度是密切相关的。同时由隧道围岩破坏过程中剪应力的演化图(见图 5)中可以得出, 隧道围岩中主要应力以剪应力为主, 破坏模式以拉剪型为主。

同时, 将围岩破裂过程的声发射活动划分为 I, II, III, IV 这 4 个阶段, 如图 3 所示, 初始期(I)声发射信号较少, 随后进入活动期(II), 声发射频度逐渐增加, 达到峰值, 然后逐次下降后形成次峰值; 以后声发射频度单调下降(III), 同时岩体也出现宏观破坏裂纹; 最后阶段(IV), 随着岩体的破坏裂纹贯通, 声发射信号逐渐趋于沉寂。

可以看出, 从声发射角度划分的 4 个过程与前述隧道围岩损伤破坏过程阶段的划分基本一致, 说明声发射信号可以很好地表征围岩的损伤特性。

3.4 工程验证

重庆通渝隧道已建成通车, 其最大埋深为 1 030 m, 施工开挖断面为马蹄形, 研究区段为二叠系栖霞组, 岩性为石灰岩, 全断面开挖。为了进一步验证隧道围岩破坏模式的模拟结果, 根据岩体波速与围岩损伤度的关系, 采用岩体波速定义的损伤变量进行间接验证。在 K22+029 断面开挖后, 利用工程多波地震仪对隧道围岩 3 m 深度范围进行了平均纵波波速测试, 测试设备见图 6, 测区布置见图 7, 测试数据及围岩损伤度计算结果见表 2。

测试结果表明, 隧道围岩开挖后岩体波速衰减与围岩损伤破坏的发展在时间及空间分布上具有一致性。马蹄形隧道开挖后拱顶部位损伤度最大, 为 0.49, 其次为左、右拱肩和左、右拱脚, 破坏模式为首先在拱顶部位受拉开裂, 其次为左、右拱肩部

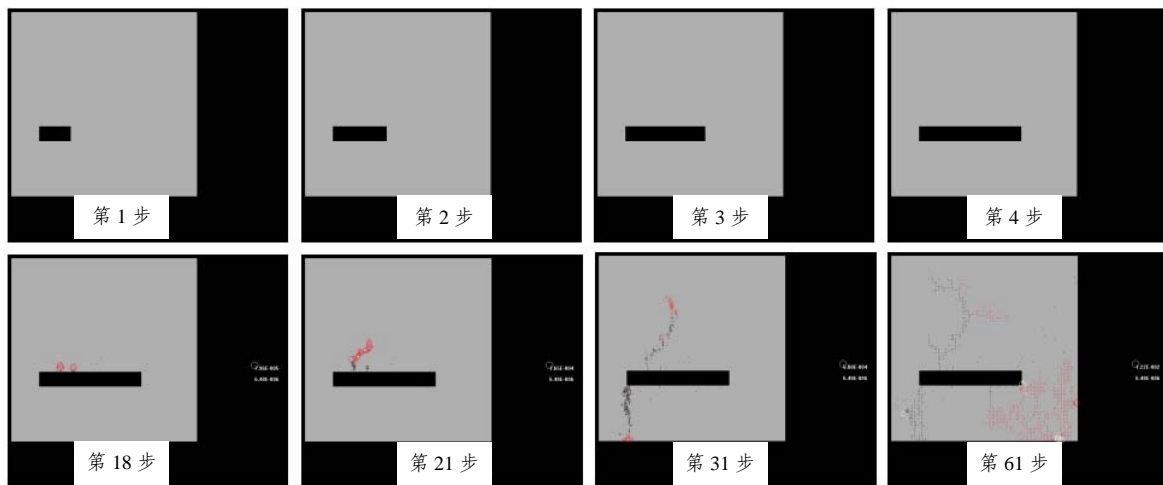


图 4 不同加载步的声发射图

Fig.4 AE map at different loading steps

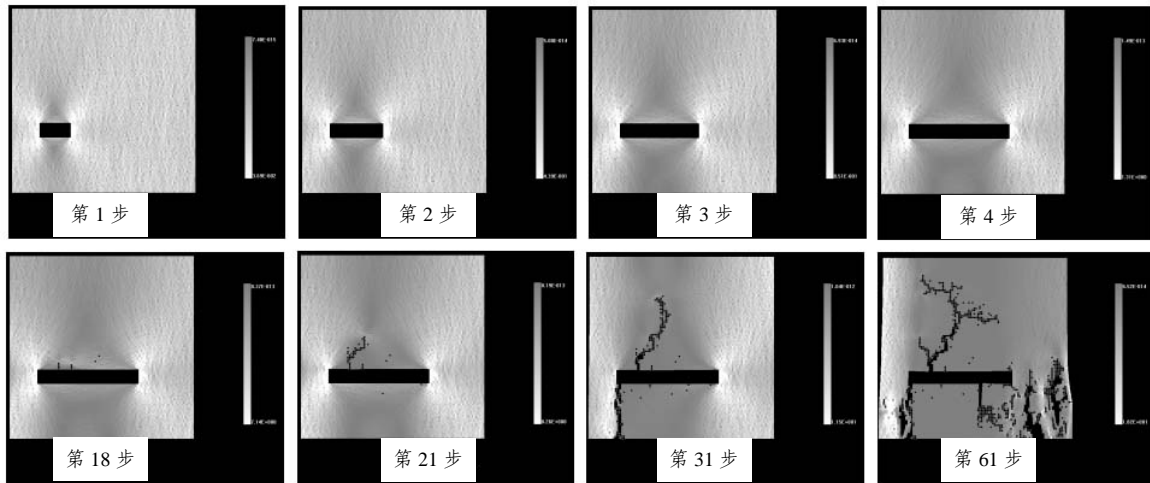


图5 不同加载步的剪应力图
Fig.5 Shear stress map at different loading steps



图6 EMS-2型工程多波地震仪
Fig.6 EMS-2 engineering multi-poly seismic system

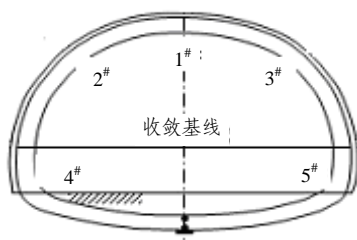


图7 围岩波速测区布置示意图
Fig.7 Sketch of layout for seismic testing zone

表2 隧道开挖后岩体纵波波速测试结果及损伤度计算结果
Table 2 Testing results of longitudinal wave velocity for rock mass and calculating results of damage degree

测区	初始波速 $/(m \cdot s^{-1})$	开挖后平均波速 $/(m \cdot s^{-1})$	损伤度 D
1#		3 590	0.49
2#		4 045	0.35
3#	5 020	3 904	0.40
4#		4 288	0.27
5#		4 161	0.31

位产生剪切破坏，最后是在拱肩部位围岩深部产生剪切破坏，这就证明了文中所提出的“初始裂纹→剪切裂纹→远场裂纹”存在的合理性以及声发射特性与围岩损伤特性的相互关联性。故在现场施工中应加强对拱顶和左、右拱肩等薄弱部位的支护工作，以确保隧道工程质量和施工安全。

4 结 论

深埋隧道围岩破坏模式的数值试验研究表明：

(1) 隧道围岩破坏的顺序是：拱顶开裂→左、右拱肩裂纹出现及扩展→左、右拱肩围岩深部出现裂纹；与深埋隧道围岩损伤区裂纹类型划分相对应，其分别是初始裂纹→剪切裂纹→远场裂纹。

(2) 深埋硬岩弹脆性破坏的主要形式为拉剪型破坏，破坏过程中声发射数量与围岩损伤程度近似成正比关系。

(3) 深部岩体损伤演化过程具有明显的非线性特性及损伤局部化特征。

(4) 隧道围岩开挖后岩体波速衰减与围岩损伤破坏的发展在时间及空间分布上具有一致性，通过岩体波速测试来评价岩体损伤过程是可行的。

(5) 由于深部岩体的复杂性，本文所做工作可能存在诸多不足，以后还将对相关问题进行后续深入研究。

参考文献(References):

[1] 王明洋, 宋 华, 郑大亮, 等. 深部巷道围岩的分区破裂机制及

- “深部”界定探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 771 - 1 776.(WANG Mingyang, SONG Hua, ZHENG Daliang, et al. On mechanism of zonal disintegration within rock mass around deep tunnel and definition of “deep rock engineering”[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 771 - 1 776.(in Chinese))
- [2] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 877 - 885.(ZHOU Xiaoping, QIAN Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877 - 885.(in Chinese))
- [3] 蒋斌松, 张 强, 贺永年, 等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982 - 986.(JIANG Binsong, ZHANG Qiang, HE Yongnian, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982 - 986.(in Chinese))
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 803 - 2 813.(in Chinese))
- [5] 王明洋, 周泽平, 钱七虎. 深部岩体的构造和变形与破坏问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 448 - 455.(WANG Mingyang, ZHOU Zeping, QIAN Qihu. Tectonic, deformation and failure problems of deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 448 - 455.(in Chinese))
- [6] 刘 立, 朱文喜, 路军富, 等. 层状岩体损伤演化与应变关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 350 - 354.(LIU Li, ZHU Wenxi, LU Junfu, et al. Research on relation between damage evolution and strain of stratified rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 350 - 354.(in Chinese))
- [7] 吉小明. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702.(JI Xiaoming. Study on mechanical and hydraulic behaviors of tunnel surrounding rock masses in excavation-disturbed zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 697 - 1 702.(in Chinese))
- [8] 刘元雪, 施建勇, 许 江, 等. 盾构法隧道施工数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 239 - 243.(LIU Yuanxue, SHI Jianyong, XU Jiang, et al. Numerical simulation of excavation of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 239 - 243.(in Chinese))
- [9] 周小平, 徐小敏, 卢 萍, 等. 深埋巷道的选型分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增1): 2 700 - 2 706.(ZHOU Xiaoping, XU Xiaomin, LU Ping, et al. Analysis of shape selection for deep roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 2 700 - 2 706.(in Chinese))
- [10] 张 平, 李 宁, 贺若兰. 含裂隙类岩石材料的局部化渐进破坏模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050.(ZHANG Ping, LI Ning, HE Ruolan. Research on localized progressive damage model for fractured rocklike materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 043 - 2 050.(in Chinese))
- [11] 刘冬梅, 蔡美峰, 周玉斌, 等. 岩石裂纹扩展过程的动态监测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 467 - 472.(LIU Dongmei, CAI Meifeng, ZHOU Yubin, et al. Dynamic monitoring on developing process of rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 467 - 472.(in Chinese))
- [12] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944 - 950.(ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 944 - 950.(in Chinese))
- [13] 梁正召, 唐春安, 张永彬, 等. 岩石三维破裂过程的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 931 - 936.(LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, ZHANG Yongbin, et al. 3D numerical simulation of failure process of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 931 - 936.(in Chinese))
- [14] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [15] 胡江春, 王红芳, 祝彦知, 等. 深部岩石隐性裂纹的电化学检测机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 048 - 1 055.(HU Jiangchun, WANG Hongfang, ZHU Yanzhi, et al. Detestability mechanism of deep rock latent crack using electrochemical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 048 - 1 055.(in Chinese))
- [16] 凌建明, 刘尧军. 卸荷条件下地下洞室围岩稳定的损伤力学分析方法[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, 11(4): 10 - 15, 68.(LING Jianming, LIU Yaojun. Damage mechanics theory for stability analysis of surrounding rock of underground excavation[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1998, 11(4): 10 - 15, 68.(in Chinese))
- [17] 张后全, 夏洪春, 唐春安, 等. 巷道围岩破坏与支护方案选取可视化研究[J]. 金属矿山, 2004, (12): 5 - 8.(ZHANG Houquan, XIA Hongchun, TANG Chun'an, et al. Visual study on failure pattern of tunnel surrounding rock and selection of support design[J]. Metal Mine, 2004, (12): 5 - 8.(in Chinese))
- [18] 徐 涛, 于世海, 王述红, 等. 岩石细观损伤演化与损伤局部化的数值研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 160 - 163.(XU Tao, YU Shihai, WANG Shuhong, et al. Numerical investigation on mesoscopic damage evolution and localization behaviors of rock[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2005, 26(2): 160 - 163.(in Chinese))
- [19] 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): 576 - 580.(CHEN Zhonghui, THAM L G, YEUNG M R. Numerical simulation of damage and failure of rocks under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 576 - 580.(in Chinese))