

文章编号:1000-582X(2009)02-0212-06

矸石山稳定性非线性破坏准则数值模拟分析

董 倩^{1,2}, 朱正伟², 刘东燕²

(1. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆 400042; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030)

摘 要:在探讨矸石山主要特征的基础上,基于 Hoek-Brown 非线性强度准则进行 FLAC(fast lagrangian analysis of continua)数值模拟,分析矸石山稳定性随堆积高度的增加动态的变化过程。结果表明:随堆积高度增加,矸石山位移、变形程度增大,潜在滑移面逐渐形成,失稳破坏趋势渐增,且矸石山散粒层高度、面积增加,坡面出现局部滑塌几率增大;依据非线性强度准则计算得到的安全系数随矸石山高度增加而减小,符合矸石山堆积越高越不安全的实际情况。计算结果和理论分析表明采用文中方法分析矸石山稳定性具有合理性。

关键词:堆积散体;矸石山稳定性;自组织临界性;抗剪强度非线性;FLAC 数值模拟

中图分类号:TU441.35

文献标志码:A

Stability of various height waste dumps based on nonlinear strength criterion

DONG Qian^{1,2}, ZHU Zheng-wei², LIU Dong-yan²

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400042, P. R. China; 2. Department of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Coal mining waste dumps are representative artificial accumulations of bulky rock and soil material. Certain factors make these dumps possess characteristics such as self-organized criticality, nonlinear shear strength of the waste accumulation. We discusse the main waste dump characteristics and subsequently produced numerical simulations of the stability of waste dumps of various heights using the Fast Lagrangian Analysis of Continua and based on the Hoek-Brown nonlinear strength criterion. The simulation calculation results show that the stability is a dynamic evolving process corresponding to increasing waste dump height. Safety factors, based on a nonlinear rule, vary with the waste dump height. Theoretical analysis and calculated outcomes reveal a progressive failure rule of waste dumps, and all indicate the methods we put forward are reasonable.

Key words: bulky rock and soil material; waste dump; stability; self-organized criticality; nonlinear; shear strength; Fast Lagrangian Analysis of Continua

矸石山是由煤炭开采、洗选加工中废弃的岩土材料露天堆积而成,为典型人工堆积散体,自然安息

角 $38^{\circ}\sim 40^{\circ}$,单体高度一般为 20~60 m,结构疏松,稳定性普遍较差。当堆积过高,坡度过大,受人为开

收稿日期:2008-09-02

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(2006BB7171);重庆国土资源和房屋管理局科研计划资助项目(财建[2005]660号)

作者简介:董倩(1971-),女,重庆大学博士,主要从事地质灾害防治等研究。

刘东燕(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)liudy@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

挖、爆炸、暴雨侵蚀影响时,易形成坍塌、滑坡、泥石流等重力灾害。

中国作为世界上最大的煤炭生产、消费国,矸石是排放及积存量最大、占用场地最多的工业废弃物,现全国有上规模矸石山 1 500 余座,累计存量约 34×10^8 t,占地面积约 13 300 hm^2 ,每年新增矸石占地约 400 hm^2 ,矸石山几乎成为中国煤矿的“标志”^[1-2]。由于贮矸场多数未经严格设计,大多堆放不规范,导致各地时有矸石山垮塌、滑坡等事故的发生,造成生命、财产巨大损失^[3]。为避免矸石山地质灾害的发生,矸石山稳定性的分析研究具有重要意义。

1 矸石山主要特征

1.1 矸石散体的抗剪强度

矸石散体是物质组成比较特殊的土石材料,粒度构成上属于碎石类土^[4-5],粒径变化幅度大,从小于 1 mm 到几十厘米均有,其强度决定于母岩强度、粒间摩擦与咬合效果的综合作用效应。矸石散体主要由页岩类、泥岩类、砂岩类、碳酸盐岩类及煤粒、硫结核组成,除砂岩类风化较慢、粉碎较难外,其余均较易破碎、风化;另外矸石由人工开采破碎而成,颗粒粒径大,矸石棱角分明,近球度小,矸石间多为点接触,受力后易形成应力集中,且经开采破碎,矸石体内部多存在微小损伤裂纹,是受力薄弱区。因此,不同于多数岩土介质,在低围压($\sigma_3 < 300$ kPa)下,矸石散体就表现出较明显剪胀和颗粒破碎特性,随应力增高,颗粒破碎效应逐步占主导作用,最终表现为矸石散体摩尔强度包线随围压增大成曲线形式。

1.2 矸石山结构特征

以自然下落方式堆积而成的矸石山,其表层矸石散体颗粒位于临空面,处于相对简单的应力状态,在微小扰动下容易失稳,为散粒层;而矸石山内部的矸石散体颗粒被周围颗粒所围绕,处于复杂应力状态,颗粒的运动受临近颗粒的制约,形成颗粒间应力传递的组织结构,为摩阻层。摩阻层这种结构增强了颗粒抵抗扰动的能力,仅当扰动强度不断增大而破坏这种组织结构时,才可能发生深层剪切滑移。矸石山这种典型的散粒层与摩阻层的二元结构对矸石山临界状态下的动态特性具有重要影响。

1.3 矸石山自组织临界性

矸石山的材料几何特点及堆积方式决定了其为巨大的微结构空间分布差异大的复合系统。这个复合系统包含着众多发生短程相互作用的组元,使得

此复合系统可自然地无需由外部加以调整而从随机状态演化到一种有序的失稳边缘状态——自组织临界状态,在此状态下,由外部流入矸石山系统的能量由于系统组元依据内在规律相互作用(即自组织)而被系统吸收和耗散掉,系统能量状态平均值在某一个临界值附近呈无规律变化^[6-7]。此临界状态下,小事件引起的连锁反应能够对矸石系统中任何数目(包括大数目)的组元产生影响,从而可能导致大规模事件(大灾难)的发生^[8]。

在排弃矸石或矸石山坡面浅层矸石颗粒受到扰动滑落时,矸石下落过程中以较大作用力作用于它所经过之局域,带动原来接近不稳定状态的静止矸石,使干扰矸石数量和强度递增。由于矸石颗粒非均匀程度大(非均匀系数 η 大于 3),矸石山表面粗化、凹凸不平,颗粒滑动时咬合、碰撞几率大,使得滑动摩擦路径曲折,能产生较大摩擦耗散,从而降低了扰动-反馈的放大。当坡面上有足够大的摩擦阻力增强了动能转化为热能的耗散强度,自组织临界性转变尺度阈值增大,此时系统鲁棒性占优,矸石山可保持稳定状态;而当大部分势能只能转化为动能从系统中耗散掉时,则有可能产生大规模崩塌。

随着逐年堆积,矸石山作为广延耗散动力系统这种开放体系,在其规模变化、结构变化和扰动条件变化这 3 种因素的综合作用下,矸石山必然会从一个自组织临界状态逐渐向另一个临界状态过渡、演化。

1.4 矸石山整体稳定性与局部稳定性

矸石山散体颗粒具有部分流动性,临空面以边坡形式出现,矸石山临界角是由坡面最不稳定的颗粒所控制^[3],而最不稳定性颗粒达到临界态时该区域稳定性差。因此,坡面整体结构稳定性取决于坡面未达到临界态区域所占坡面全部区域比例的大小,即局部稳定性的总和构成总体稳定性。所以,当矸石山堆砌于临界角时,若坡面各区域均达到或近似达到临界态,则抗扰储备小,扰动易于产生链式放大,矸石山整体稳定程度较低;若坡面各区域只有部分达到临界态,当各部分矸石停止下滑(活动性消失)与矸石继续下滑或带动该部分其它矸石下滑(活动性分岔)的概率总体上平衡时,由扰动引起的坍塌颗粒的运动可以被抑制,扰动不易产生连锁反应。由于局部不稳定区域的比例、空间分布、时间分布及下落矸石的空间运动路径都是随机的,所以,任何规模的崩塌都可能发生。

由以上可见,矸石山特有的散体物料构成、排弃

方式、自然堆积等因素造成其特殊性。因此,随矸石山堆积高度增大,载重增加,使得矸石体内围压增大,矸石散体强度对应改变或发生软化,矸石山易剪切破坏而失稳;另外,矸石山堆高增加后,排弃矸石势能必然增大,滑落“连锁反应”过程变长,向下传递过程中,动能如未转化为热能得以耗散,扰动将逐渐增强,带动坡面下部处于临界状态的矸石发生移动,使坡面上部摩阻层的矸石失去支撑,导致上部摩阻层发生大规模剪切式滑移,如果这种被放大的扰动继续向下推进,将会产生“累进式”破坏,直至边坡下部的摩阻层破坏滑出边界。

因此,矸石山稳定性是随其堆积高度增加而动态变化的过程,所以考虑采用 FLAC (fast lagrangian analysis of continua)数值模拟对矸石山不同高度下的稳定状态进行分析,以掌握随高度增加矸石山稳定性的渐变规律,为及时采取相应加固或安全措施提供依据。

FLAC 采用显式算法来获得模型全部运动方程的时间步长解,可追踪材料的渐进破坏和垮落,使得 FLAC 很容易模拟渐进破坏等动态问题,同时 FLAC 所用的是全动力学方程 (full dynamic equation),特别适用于模拟岩土类非线性材料的几何大变形问题。

2 Hoek-Brown 非线性强度准则引入

由于矸石散体强度变形特性复杂,低压剪胀、颗粒破碎明显,抗剪强度与应力呈非线性关系,所以,不同堆积高度下矸石山体内围压不同,坡体不同围压处,矸石散体抗剪强度也有所不同。而矸石山常规堆积高度下,危险滑弧处的围压大致在 70 ~ 400 kPa,采用线性强度指标可能会低估矸石山的实际稳定状态;当矸石山堆积较高时,矸石山体内围压增大,采用线性强度指标可能会高估矸石山实际稳定状态。因此,稳定分析时应考虑矸石散体抗剪强度与应力的非线性关系^[9-13]。

FLAC 数值模拟时,对于每个单元可计算对应的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 ,而岩土体非线性强度准则中,Hoek-Brown 准则是根据对密集节理的岩体进行三轴试验所得到的基于最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的非线性破坏判据,不但适应于密集节理岩体,当 Hoek-Brown 准则的经验常数 $m < 0.05$ 时,还适用于废石、堆石等散体材料,所以 Hoek-Brown 准则也适用于矸石散体。

由于 FLAC 塑性模型只包括 Mohr-Coulomb、Drucker-Prager 等 6 种,没有 Hoek-Brown 模型,所以采用 FLAC 内嵌 FISH 程序语言编写计算模型程序,根据 Hoek-Brown 准则,对应每个单元计算出近似于 Hoek-Brown 非线性破坏准则的 Mohr-Coulomb 模型参数,然后采用对应参数进行计算。在此情况下,每个单元的粘聚力 c 、摩擦角 φ 值只与该单元的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 有关,可适用于矸石山不同堆高、坡体处于不同应力状态和矸石散体强度非线性特征的计算情况。

FLAC 的 FISH 语言是强大的类似批处理文件的内嵌算法语言,利用 FISH 语言可自定义新的函数或本构模型来满足不同岩土工程问题的计算需求。

采用近似于 Hoek-Brown 非线性破坏准则的 Mohr-Coulomb 模型参数的具体程序算法如下。

Hoek-Brown 破坏准则基本方程为^[14-15]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{\sigma_3 \sigma_c m + s \sigma_c^2}, \quad (1)$$

式中: σ_c 为完整岩块的单轴抗压强度, Pa; σ_3 为围压, Pa; m 和 s 分别为表征各个岩块形状和咬合程度的无量纲常数。据 FLAC 规定,压应力为负,故 FLAC 中 Hoek-Brown 准则表达为

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sqrt{-\sigma_3 \sigma_c m + s \sigma_c^2}. \quad (2)$$

对于一确定围压 σ_3 , 可对应式(2)取一条切线,该切线等价于该确定 σ_3 下的 Mohr-Coulomb 准则。当 Mohr-Coulomb 准则以第一、第三主应力表达时,其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } N_\varphi &= \tan^2\left(\frac{\varphi}{2} + 45^\circ\right) = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \\ -\sigma_c^M &= 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right). \end{aligned}$$

对于给定围压 σ_3 , 且压应力取负,则式(2)的切线方程为

$$\sigma_1 = -N_\varphi \sigma_3 - \sigma_c^M. \quad (4)$$

式(4)变换为

$$\begin{aligned} \sigma_c^M &= -\sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi = -\sigma_3 + \sqrt{-\sigma_3 \sigma_c m + s \sigma_c^2} - \\ &\sigma_3 N_\varphi - \sigma_3 (1 - N_\varphi) + \sqrt{-\sigma_3 \sigma_c m + s \sigma_c^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

式(2)对应不同 σ_3 的斜率为

$$N_\varphi(\sigma_3) = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \frac{\sigma_c m}{2 \sqrt{-\sigma_3 \sigma_c m + s \sigma_c^2}}. \quad (6)$$

由式(5)(6)可得到不同围压下的粘聚力 c 、内

摩擦角 φ 值:

$$c = \frac{\sigma_c^M}{2 \sqrt{N_\varphi}}, \quad (7)$$

$$\varphi = 2 \arctan \sqrt{N_\varphi} - 90^\circ. \quad (8)$$

由式(6)(7)得到 Hoek-Brown 屈服准则的切线近似值粘聚力 c 、内摩擦角 φ ,即可采用 Mohr-Coulomb 模型进行计算。

如图 1,比较 Hoek-Brown 非线性破坏准则与近似于 Hoek-Brown 非线性破坏准则的 Mohr-Coulomb 线性准则,对于给定最小主应力 σ_3 ,当 σ_3 变化,粘聚力 c 、内摩擦角 φ 也对应改变,线性近似的 c 、 φ 值可以很好地近似 Hoek-Brown 非线性破坏准则。另外,计算中值得注意的是,如果 σ_3 为拉应力时,式(6)中 σ_3 定义为 0。

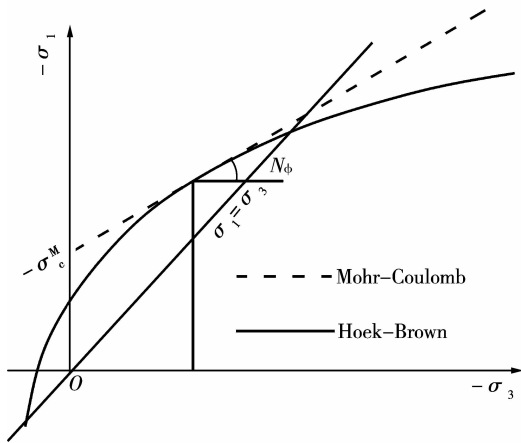


图 1 Hoek-Brown 准则的线性近似示意图

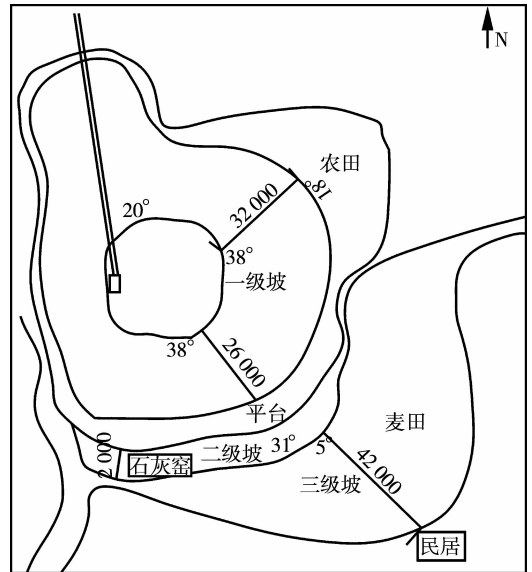
3 中梁山南矿矸石山数值模拟分析

3.1 计算模型的建立

重庆中梁山矿区地处丘陵地貌,出露最老地层为二叠系上统龙潭组,最新为三叠系上统须家河组,低洼处分布少量第四系棕黄和紫红色表土。南矿矸石山地形图见图 2。

根据踏勘知,南矿矸石山仍处于持续堆积中,由

于不仅在顶部继续堆放,且往坡面前方扩容,使得矸石山散粒层的高度、面积逐渐增大。随着矸石山持续扩容,1985 年前堆积矸石的坡面将会逐渐被新堆积矸石覆盖,不但坡面角度改变,且矸石散体物理力学性能也发生改变。以下针对南矿矸石山北偏东 $48^\circ 2\#$ 坡,分析堆积扩容对其稳定性的影响。



单位: mm

图 2 重庆中梁山南矿矸石山地形图

2#坡现高 30 m,定义计算模型坐标系的 X 方向指向坡面反向,Y 方向竖直向上,坐标原点在矸石山 1985 年以前堆积矸石与原地面交界处。模型范围: X, $-6 \sim 80$ m; Y, $-10 \sim 30$ m。模型侧边界采用单向约束,在底边界采用双向约束的形式。

物理力学参数依据现场试验、《中梁山煤矿地勘报告》以及工程经验和工程地质手册等进行选取。因老矸石散体已堆积多年,固结泥化,老矸石散体采用线性强度参数;矸石散体的岩石组分以石灰岩、页岩、泥灰岩等为主,由级配试验知坡面矸石散体 $d_{10} = 2$ mm、 $d_{30} = 13$ mm、 $d_{60} = 50$ mm,因此,新矸石散体采用非线性强度参数,取 Hoek-Brown 破坏准则的无量纲常数 m 为 0.015、 s 为 2.0×10^{-7} ; σ_c 取为 60 MPa,其它物理力学参数见表 1。

表 1 中梁山南矿矸石山计算模型的物理力学参数取值

岩土体	泊松比	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 /($^\circ$)	粘聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
1985 年后堆积矸石	0.20	35.42	47.20	21.5			0
1985 年前堆积矸石	0.30	50.00	108.33	21.0	30	0.030	0
混合残积物	0.33	20.68	53.92	18.5	21	0.035	0
强风化带	0.34	149.25	416.67	20.6	34	0.045	0

3.2 计算结果分析

2#坡堆积高度为 30、35、40 m 时数值模拟的位移、变形计算结果见表 2。

表 2 2#坡不同堆积高度位移、变形计算结果

高度/m	最大位移 矢量/m	最大速度矢量 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大剪 应变增量
30	0.146 2	$7.121\text{e}-9$	0.005 35
35	0.190 3	$2.803\text{e}-8$	0.005 68
40	0.237 8	$3.863\text{e}-8$	0.006 20

由表 2 可知,随矸石山堆积高度增加,位移、变形程度增大,失稳破坏趋势渐增。

塑性区分布见图 3。从图 3 可看到:矸石山体内塑性区出现在坡体内下后部,范围较大,且随高度增加,塑性区范围增大,当堆积高度达到 40 m 时,坡内塑性区逐渐靠近坡面前缘形成圆弧形,说明矸石山潜在滑移面随高度增加逐渐形成。由于矸石山堆积规模增大后,散粒层高度、面积增加,矸石山可能发生局部坍塌的浅层范围增加,且下落矸石滑动路径增长,产生的动能扰动增大,说明随高度增加坡面局部滑塌出现几率增大。

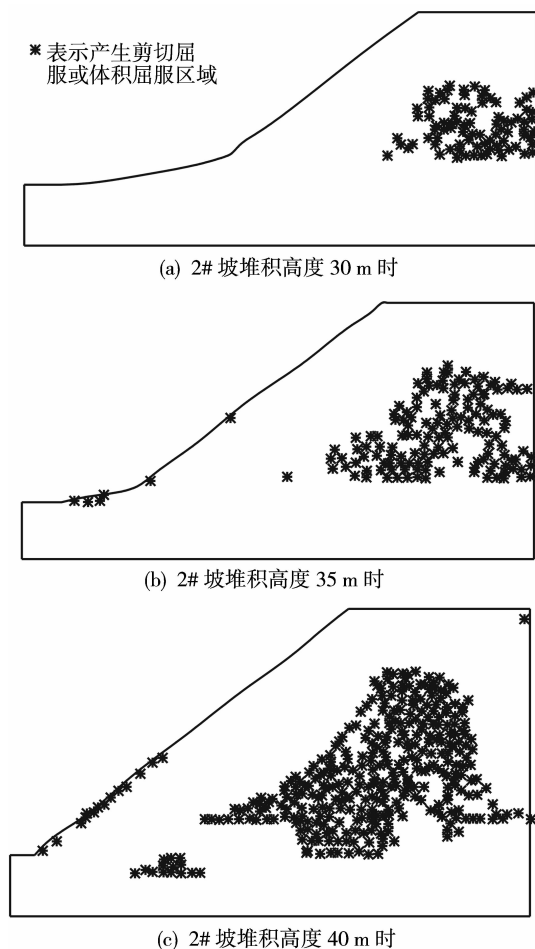


图 3 2#坡不同堆积高度的塑性区分布情况

图 4 是非线性准则与线性准则下安全系数计算结果。

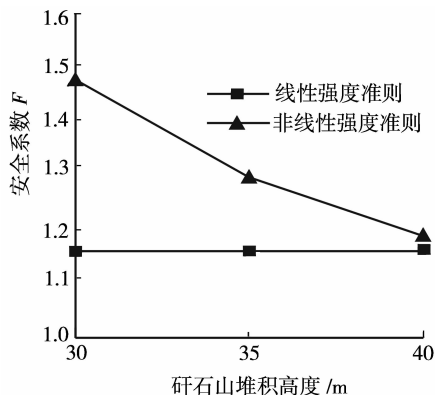


图 4 2#坡不同堆积高度时的安全系数

由图 4 可以看到,采用线性强度准则计算的安全系数 F 并没有明显变化,而采用非线性强度准则计算的安全系数 F 随堆高的增加而减小,这符合矸石山堆积越高越不安全的实际情况;另外,线性准则计算的安全系数低于非线性准则的安全系数,这是由于矸石山在此堆积高度范围内,危险滑弧处围压 70~400 kPa,为低围压状态,采用线性强度准则低估了矸石山稳定性。由以上可见,采用非线性准则进行矸石山稳定分析具有合理性。

4 结 语

1) 矸石山散体颗粒非均匀度大,临空面以边坡形式出现,由于排弃方式、自然堆积等因素造成矸石山具有其特殊性:矸石散体变形破坏特性复杂,抗剪强度具有非线性特征;矸石山堆积后呈现散粒层与摩阻层二元结构;矸石山整体结构的稳定性由坡面未达到临界态的区域所占坡面整体区域的比例决定;堆积过程及成形后矸石山必然从一自组织临界状态逐渐向另一个临界状态演化。

2) 采用 Hoek-Brown 非线性强度准则进行 FLAC 数值模拟分析表明:矸石山稳定性随堆高增加呈动态变化过程;且非线性强度准则计算的安全系数随堆高增加而减小,符合矸石山堆积越高越不安全的实际情况。说明采用 Hoek-Brown 非线性强度准则进行 FLAC 数值模拟可合理反映矸石山变形、失稳特性,适应矸石山坡体处于不同应力状态、矸石散体剪切强度非线性、矸石山失稳破坏具有渐进性这类问题的计算分析。

参考文献:

[1] 胡志鹏,杨燕. 煤矸石综合利用前景广阔[J]. 建材工业

- 信息,2004(1):6-9.
- HU ZHI-PENG, YANG YAN. Prospects of coal waste comprehensive utilization [J]. Building Materials Industry Information, 2004(1):6-9.
- [2] 刘红琳. 浅析煤矸石的综合利用[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(5):290-291.
- LIU HONG-LIN. Analysis on the comprehensive utilization of the gangue [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007, 17(5):290-291.
- [3] 潘志刚, 姚艳斌, 黄文辉. 煤矸石的污染危害与综合利用途径分析[J]. 资源·产业, 2005, 7(1):46-50.
- PAN ZHI-GANG, YAO YAN-BIN, HUANG WEN-HUI. Analysis of pollution harm and comprehensive utilization of coal gangues[J]. Resources & Industries, 2005, 7(1):46-50.
- [4] LAI X P, MO W, XIE F H. Quantitative analysis of biotechnical reinforcement for a steep slope consisting of composite coal-gangue-soil medium adjacent to a mined-out area [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 12(6):489-495.
- [5] TIAN D M, YAO J, JIANG Z, et al. The experimental study of the coal gangue as gel filling materials[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2008, 14(1):115-121.
- [6] ELMER F J. Self-organized criticality with complex scaling exponents in the train model [J]. Physical Review E, 1997, 56(6):6225-6228.
- [7] 高召宁, 姚令侃, 徐光兴, 等. 基于图型动力学的滑面演化过程研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6):866-872.
- GAO ZHAO-NING, YAO LING-KAN, XU GUANG-XING, et al. Researches on evolution of sliding surface with pattern dynamics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6):866-872.
- [8] 高召宁, 姚令侃, 苏凤环, 等. 大尺度散体组构分维和SOC判据研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1):86-92.
- GANG ZHAO-NING, YAO LING-KAN, SU FENG-HUAN, et al. Configuration fractal and SOC criterion of large scale granular material and their application in mountain hazards [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(1):86-92.
- [9] QIAO L, LIU X B. Evaluation method for expressway rock slope stability based on numerical simulation[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2004, 10(2):15-19.
- [10] LU G B, LI Y, WU X Y. Study on the quality of site in the mining district gangue of abandoned place [J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2008, 10(1):73-77.
- [11] PENG F L, LI J Z. Numerical study on deformation and failure of reinforced sand[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(2):220-225.
- [12] CHENG F, MA C D, XU J C. Dynamic response and failure behavior of rock under static-dynamic loading[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(3):354-358.
- [13] WANG J F, CHEN Z Y, CHANG K T. Slope stability analysis using anisotropic and nonlinear failure criteria[R]. London: Taylor & Francis Group, 2004.
- [14] 胥月稳, 俞茂宏, 王思敬. 岩石的非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10):1435-1441.
- QUE YUE-WEN, YU MAO-HONG, WANG SI-JING. Nonlinear unified strength criterion of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10):1435-1441.
- [15] 路德春, 江强, 姚仰平. 广义非线性强度理论在岩石材料中的应用[J]. 力学学报, 2005, 137(6):46-51.
- LU DE-CHUN, JIANG QIANG, YAO YANG-PING. Applications of generalized non-linear strength theory to rock materials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2005, 137(6):46-51.

(编辑 张 苹)