

# 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC<sup>3D</sup> 分析

闫长斌, 徐国元, 李夕兵

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 针对厂坝铅锌矿受到乱采乱挖破坏的情况, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 对爆破震动作用下采空区的稳定性进行了数值分析。根据现场实测数据, 选取了 2 条不同的实测速度时程曲线作为爆破震动输入, 分别进行了静力和动力计算。分析结果表明: (1) 采空区开挖后, 最大位移量为 4.75 mm; (2) 施加爆破动载荷后, 最大位移量增至 5.47 mm, 增幅与爆破震动速度成正比; (3) 围岩位移分布的变化受震动波形的影响。爆破震动作用下围岩应力场发生二次重分布, 塑性区分布面积明显扩大, 采空区右上方露天边坡脚亦受到影响。分析结果与实际观测结果相吻合, 并给出了避免爆破震动诱发采空区失稳塌陷的几条建议。

**关键词:** 爆破工程; 采矿工程; 爆破震动; 采空区; 稳定性; FLAC<sup>3D</sup>; 数值模拟

**中图分类号:** TD 235; TD 85

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)16 - 2894 - 06

## STABILITY ANALYSIS OF MINED-OUT AREAS INFLUENCED BY BLASTING VIBRATION WITH FLAC<sup>3D</sup>

YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** For the reason that Changba lead-zinc mine is severely destroyed by disordered mining, the numerical analysis of mined-out areas under blasting vibration is carried out with FLAC<sup>3D</sup>. Two different measured velocity time-dependent curves are selected as blasting vibration input according to the in-situ test data; and static calculation and dynamic calculation are carried out, respectively. The analytical results show that the maximum displacement of surrounding rock is 4.75 mm after mined-out areas are excavated, while the maximum displacement of surrounding rock increases to 5.47 mm after the blasting dynamic loading is applied, and amplitude of increasing displacement is proportional to the velocity of blasting vibration. The shape of vibration wave influences the variation of displacement distribution for surrounding rock. When the blasting vibration dynamic loading is applied, the second redistribution of stress field of surrounding rock occurs; and the distribution area of plastic zone is expanded obviously. The foot of the right open slope above the mined-out area is also influenced as well. The analytical results are accordant with the observed results. Several suggestions to avoid instability and subside of mined-out areas induced by blasting vibration are brought forward.

**Key words:** blasting engineering; mining engineering; blasting vibration; mined-out areas; stability; FLAC<sup>3D</sup>; numerical simulation

## 1 引言

爆破震动是爆破公害之一, 不但对地面建(构)

筑物的安全产生影响, 而且对采空区等地下洞室的围岩产生损伤和扰动, 甚至引起失稳破坏<sup>[1~7]</sup>。对爆破震动危害的研究, 主要是进行现场测试, 根据实测数据, 结合爆破安全规程, 确定最大震速和安

**收稿日期:** 2005 - 04 - 21; **修回日期:** 2005 - 06 - 14

**基金项目:** 国家自然科学基金重大项目(50490272, 50490274); 国家“十五”科技攻关项目(2003BA612A - 10 - 2); 中南大学博士学位论文创新工程项目(040109)

**作者简介:** 闫长斌(1980 - ), 男, 2001年毕业于中南工业大学建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程与地下工程方面的研究工作。E-mail: yanchangbin\_2001@163.com。

全距离。该方法能直观地反映爆破震动危害，但无法对爆破震动引起的围岩动应力场、位移和塑性区的变化以及动力失稳机制进行研究。而数值模拟方法可以系统地研究爆破作用下围岩的动应力场分布规律及动静应力场的叠加作用机理，因此成为近年来研究爆破震动作用的有效方法<sup>[5~8]</sup>。鉴于 FLAC<sup>3D</sup> 在岩土力学分析中的优势和求解动力问题的特点，使得其可很好地解决非线性动力分析问题。FLAC<sup>3D</sup> 已成功应用于岩土开挖、边坡稳定分析及地震动力响应分析等许多领域<sup>[9~12]</sup>。

厂坝铅锌矿区位于甘肃省成县的黄渚镇，由厂坝、小厂坝和李家沟组成，是我国特大型铅锌矿床之一。20 世纪 80 年代后期以来，当地乱采乱挖留下的数百万平方米未处理群采空区，给矿山安全生产构成了严重威胁。群采空区诱发的地质灾害时有发生，致使矿山曾连续发生重大事故<sup>[13~15]</sup>。特别是近年来，爆破地震波作用下大范围采空区发生动力失稳的趋势日益明显。为保障露天转地下过渡层的安全生产，进行了爆破地震效应现场测试研究，获得了较准确的基础数据。为进一步研究复杂采空区在爆破震动作用下产生动力失稳的过程和机理，本文在现场测试的基础上，同时考虑开挖过程和爆破震动对采空区稳定性的影响，利用 FLAC<sup>3D</sup> 进行了三维数值模拟研究。

## 2 FLAC<sup>3D</sup> 动力计算步骤

FLAC<sup>3D</sup> 是二维的有限差分程序 FLAC<sup>2D</sup> 的扩展，能够进行岩石、土质和其他材料在达到屈服极限后经历塑性变形的三维空间行为分析，为岩土工程领域求解三维问题提供了一种理想的分析工具<sup>[9]</sup>。

运用 FLAC<sup>3D</sup> 进行动力计算，必须首先进行静力分析。在完成静力分析的基础上，才能施加动力载荷进行动力分析。FLAC<sup>3D</sup> 动力计算大致可以分为以下几个步骤：

- (1) 确定计算区域，并进行网格划分；
- (2) 选择动力计算模式，定义本构模型和材料的物理力学参数；
- (3) 定义计算所需的边界条件和初始条件；
- (4) 进行计算，获得初始平衡状态，即开挖前的原岩应力状态；
- (5) 进行工程(采空区)开挖计算分析，得到开挖后的静力计算结果；
- (6) 检查静力计算结果，认为满意后，设置动

力计算边界条件和所需的阻尼；

(7) 施加动力载荷，进行动力计算分析，得到动力计算结果。一般的计算流程如图 1 所示。

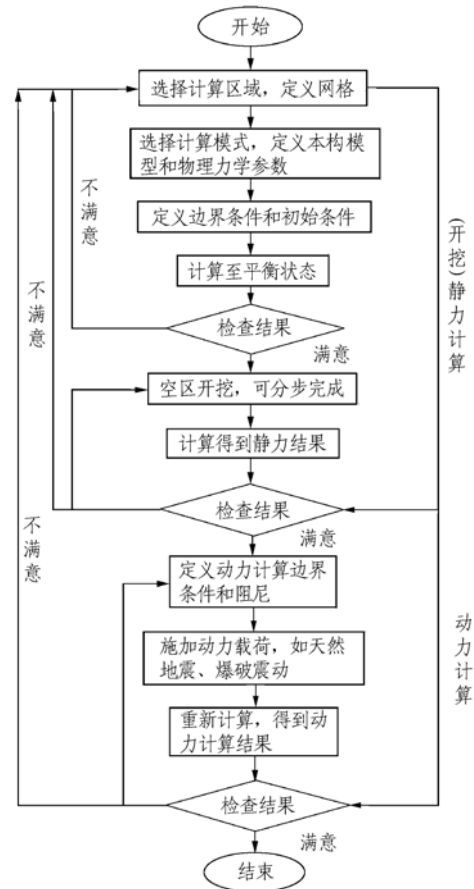


图 1 FLAC<sup>3D</sup> 动力分析流程图

Fig.1 Flow chart of FLAC<sup>3D</sup> dynamic analysis

## 3 计算分析

### 3.1 计算模型

#### 3.1.1 模型范围

根据前期采空区探测成果，2<sup>#</sup>矿体存在范围较大、互相贯通的采空区。因此，本次计算区域选择 2<sup>#</sup>矿体及周边围岩。计算区域尺寸为长 120 m，宽 180 m，高 125 m。采空区位于该区域的中部，即 1 202~1 250 分段。贯通的采空区尺寸为高 24 m，横断面为下宽上窄，底宽 36 m，顶宽 11 m，沿矿体延伸 32 m。上边界取至地表，下边界距离采空区底板 70 m，左右边界距离采空区分别为 90 m 和 60 m，沿矿体方向(Y 方向)取 88 m。根据圣维南原理，模型大小满足计算精度要求。

#### 3.1.2 模型介绍

采空区开挖后，模型的 FLAC<sup>3D</sup> 剖分网格如图 2 所示。该模型共有 70 200 个单元和 75 733 个节点；

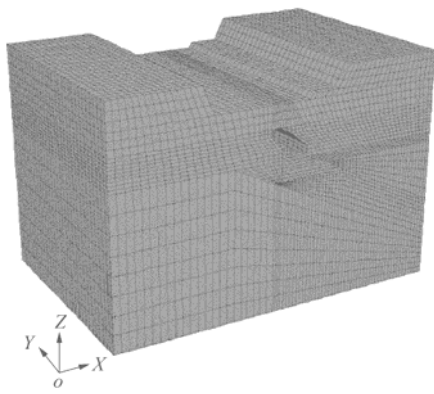


图 2 开挖后的 FLAC<sup>3D</sup> 模型

Fig.2 FLAC<sup>3D</sup> model after excavation

按岩性参数的不同, 可将模型分为 3 个区域, 即采空区、矿体和围岩。模型中的采空区的尺寸、形态和位置以前期探测结果为准。根据现场调查, 模型范围内岩性比较简单, 可分为围岩和矿石 2 大类, 矿体上下盘围岩均为黑云母片岩, 矿石为铅锌矿石。为便于计算, 模型简化为准三维情况, 即不考虑断面形状和尺寸在长度方向(Y 方向)上的变化。

3.1.3 初始应力场和边界条件

初始地应力场: 由于采空区埋深较浅, 且矿区构造应力不明显, 因此未进行现场地应力测试, 初始地应力场仅按自重应力场考虑。根据弹性力学原理可知, 竖向应力和水平应力分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_v &= \gamma H \\ \sigma_h &= k\sigma_v \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $H$  为埋置深度;  $k$  为侧压力系数, 且  $k = \mu/(1 - \mu)$ ,  $\mu$  为泊松比。

边界条件: 采用位移边界条件, 即模型的左右( $X$  方向)边界、前后( $Y$  方向)边界和底边界均施加位移约束条件, 上边界为自由边界。

3.2 岩体物理力学参数

本次计算模型中岩性较简单, 仅分为矿石和围岩 2 种。计算所需的岩体物理力学参数是根据室内试验确定的岩石物理力学参数<sup>[16]</sup>折减得来的, 具体参数结果见表 1。

表 1 厂坝铅锌矿岩体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the rocks in Changba lead-zinc mine

岩石种类	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	变形模量 /GPa	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	泊松比	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
铅锌矿石	7.716 1	0.205 2	13.22	0.629 2	71.47	0.26	2 720
黑云母片岩	8.569 3	0.245 9	12.98	0.725 8	70.77	0.22	2 720

在 FLAC<sup>3D</sup> 计算中, 岩体变形参数采用的是体积模量( $K$ )和剪切模量( $G$ )。因此, 必须将弹性模量(或变形模量)( $E$ )和泊松比( $\mu$ )转化成体积模量( $K$ )和剪切模量( $G$ ), 转化公式如下:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3)$$

3.3 计算方案

为研究采空区开挖形成的围岩应力重分布和产生的位移变化, 找出爆破震动作用下采空区围岩应力发生二次重分布的规律和位移变化, 确定爆破震动对采空区稳定的危害程度, 运用 FLAC<sup>3D</sup> 对开挖和爆破震动作用下采空区的稳定性进行了较为系统的模拟分析。分析结果可为预防采空区失稳塌陷和减震、加固、治理提供依据。根据震动载荷形式, 共有以下 3 种计算方案: (1) 自重应力场中, 采空区开挖过程计算; (2) 采空区在中深孔爆破载荷作用下的动力计算; (3) 采空区在斜坡道掘进爆破载荷作用下的动力计算。本次计算采用 Mohr-Coulomb 准则, 即弹塑性模型, 并选取大应变计算模式。

4 爆破震动输入

4.1 爆破震动速度时程

为获得第一手资料, 对厂坝铅锌矿厂坝矿区进行了爆破震动现场测试研究。测试分两个部分, 一是中深孔爆破强制崩矿地震效应测试, 二是斜坡道掘进爆破地震效应测试。有关研究和实践证明, 地震波的震动强度可用质点振动位移、速度、加速度 3 个物理量来表达。而震动速度既能反映震动能量大小, 又与爆破产生的动应力成正比, 且测试方便可靠, 因此观测物理量以质点振动速度为主。

测试仪器为成都中科动态仪器有限公司研制的 IDTS3850 二通道和三通道爆破振动记录仪, 传感器采用 SCD - Z 型垂直和 SCD - P 型水平速度传感器。

本次计算所选用的速度时程曲线共两条, 一条来自中深孔爆破强制崩矿地震效应测试, 作为动载荷一, 如图 3 所示; 另一条来自斜坡道掘进爆破斜坡道掘进爆破地震效应测试, 作为动载荷二, 如图 4 所示。爆破震动速度时程曲线的主要参数为: (1) 动载荷一的主频为 5.64 Hz, 震动时间为 1.00 s, 最大幅值为 0.181 2 m/s; (2) 动载荷二的主频为 12.28 Hz,

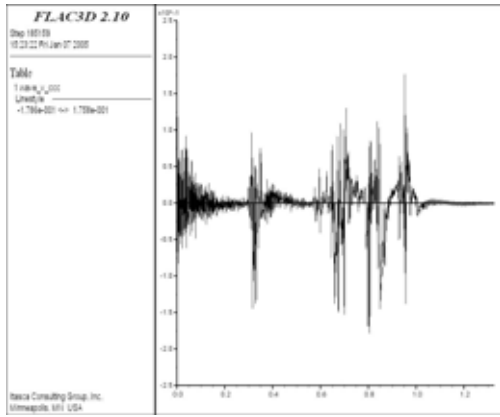


图 3 中深孔爆破震动速度时程曲线

Fig.3 Velocity time-dependent curves of medium-depth bore blasting concussion

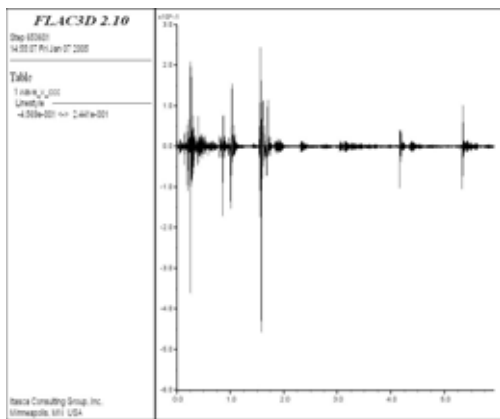


图 4 斜坡道掘进爆破震动速度时程曲线

Fig.4 Velocity time-dependent curves of decline driving blasting vibration

振动时间为 5.15 s，最大幅值为 0.460 9 m/s。

### 4.2 爆破震动载荷施加

在 FLAC<sup>3D</sup> 动力计算中，动载荷输入可以采用加速度时程、速度时程、位移时程和应力时程 4 种方式。若采用粘滞边界条件，则必须输入速度时程进行分析<sup>[2]</sup>。由于测试数据为质点振动速度，因此动载荷输入选用爆破震动速度时程。由于测试数据均来自采场或巷道的底板，因此将爆破震动载荷施加于采空区的底板，沿 Z 轴负方向传播。

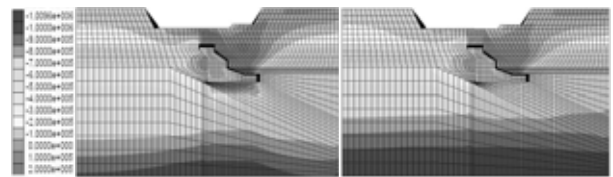
## 5 模拟结果分析

整个计算过程分为静力计算和动力计算。动力分析以静力计算为前提，即在完成静力计算的基础上，再施加动力时程进行计算。静力分析时，整个采空区分 8 个步骤开挖形成，即沿 Y 方向进行开挖，每一步开挖 4 m。每一步开挖后都计算至平衡状态，直到整个空区开挖完成为止。将两条速度时程通过

表的形式施加于采空区底板，分别进行动力计算，得到动力分析结果。

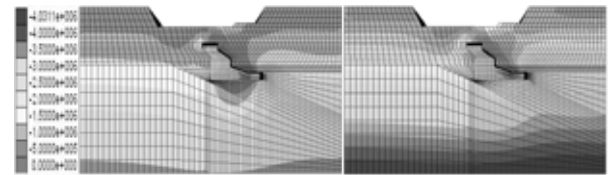
### 5.1 应力分析

图 5、6 分别为采空区开挖后和施加爆破动载后最大主应力、最小主应力分布图。可以看出，采空区开挖后应力发生重分布，边界和拐角处出现较大应力集中，采空区右上方围岩和底板出现较大的拉应力，且延伸至露天坑的右边坡脚附近；围岩中最大拉应力为 1.096 MPa，大于岩体的抗拉强度 0.245 9 MPa，右上方围岩将发生拉裂破坏；施加动载后，采空区底板处的拉应力集中已经不明显，但是右上方围岩中仍然存在较大拉应力集中，且最大拉应力仍大于岩体的抗拉强度，故应采取有效的支护措施，预防采空区右上方围岩失稳塌陷。动载荷一和动载荷二对最大主应力、最小主应力分布图的影响基本类似，所以没有在图中具体进行区分。



(a) 开挖后 (b) 动载作用后  
图 5 最大主应力分布(单位: MPa)

Fig.5 Distribution of maximum principal stresses(unit: MPa)



(a) 开挖后 (b) 动载作用后  
图 6 最小主应力分布(单位: MPa)

Fig.6 Distribution of minimum principal stresses(unit: MPa)

### 5.2 位移分析

图 7 为采空区开挖和施加动载后围岩位移分布图。可见，最大位移出现在采空区上边界，该边界形状极不规则，且已基本形成“危岩”形势。采空区开挖后围岩最大位移量大约为 4.75 mm，最大位移发生在右上方边界围岩处，同时底板和包括右上方露天边坡在内的区域也出现了较大的位移量；采空区受动载荷作用后，最大位移仍然发生在右上方边界围岩处，最大位移量较静力计算(开挖计算)结果，有所增大。采空区受动载荷一作用后，围岩最大位移量为 5.40 mm，而受动载荷二作用后，围岩最大位移量达到 5.47 mm，增幅与最大震动速度成

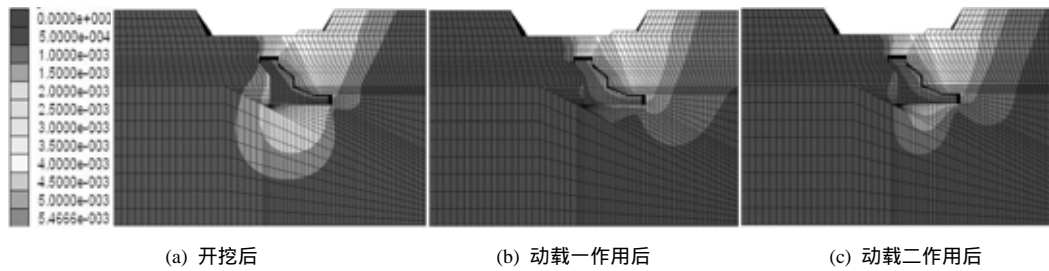


图 7 位移分布(单位: m)

Fig.7 Distribution of displacements(unit: m)

成正比。动载荷一作用后, 位移量较大的区域范围主要集中在采空区右上方, 包括整个露天边坡; 动载荷二作用后, 位移量较大的区域范围主要集中在采空区右上方和底板, 但底板处的范围较静力计算小。这说明, 施加动载荷后, 不仅增大了围岩的最大位移量, 而且改变了位移的分布形式和范围。

### 5.3 塑性区分析

图 8 为采空区开挖后和施加爆破动载后塑性区分布图。从塑性区分布情况来看, 开挖后塑性区分布较广, 以剪切塑性区为主, 集中在采空区右上方和底板附近, 且露天坑的右边坡脚处也出现塑性区。很明显, 采空区受爆破动载荷作用后, 塑性区分布范围比静力计算结果大, 且动载荷二作用后比动载荷一作用后, 塑性区范围大。说明塑性区分布面积也与动载荷幅值成正比。

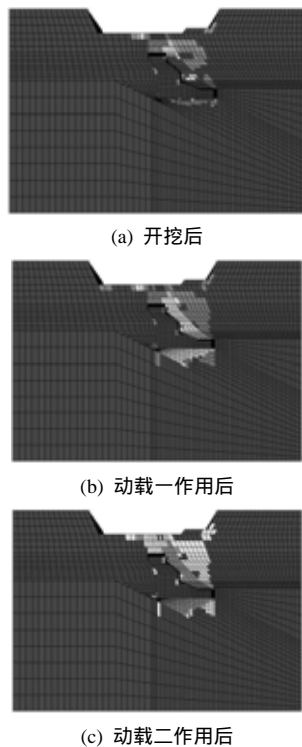


图 8 塑性区分布

Fig.8 Distribution of plastic zones

## 6 结论与建议

(1) 采空区开挖后, 引起围岩应力重分布和应力集中; 施加爆破动载荷后, 围岩应力场发生二次重分布; 围岩最大位移量增大, 且增幅与最大震动速度成正比; 爆破震动作用不仅增大了围岩最大位移量, 而且改变了位移的分布形式和范围。

(2) 已连通、范围大、且形状不规则的采空区开挖后塑性区范围较大, 且延伸至右上方露天坑边坡脚; 施加爆破动载荷后, 塑性区会进一步扩大, 扩大幅度与动载荷幅值成正比。

(3) 复杂采空区在爆破震动荷载作用下发生失稳塌陷的危险性增加。

(4) 避免爆破动载荷引发采空区顶板塌陷的几条建议:

- ① 尽量减少最大段药量, 并采用微差爆破等减震措施。
- ② 对出现的塑性区, 应采取喷射混凝土、锚杆、锚索等有效支护措施。
- ③ 应对露天坑右边坡进行监测, 必要时采取加固措施。

### 参考文献(References) :

[1] 言志信, 王永和, 江平, 等. 爆破地震测试及建筑结构安全标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 907 - 1 911.(Yan Zhixin, Wang Yonghe, Jiang Ping, et al. Study on measurement of blast-induced seism and building safety criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 907 - 1 911.(in Chinese))

[2] Singh P K. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, (39): 959 - 973.

[3] Yang R L, Rocque P, Katsabanis P, et al. Measurement and analysis

- of near-field blast vibration and damage[J]. *Geotechnical and Environmental Engineering*, 1994, 12(3): 169 - 182.
- [4] 言志信, 吴德伦, 王 漪, 等. 地震效应及安全研究[J]. *岩土力学*, 2002, 23(2): 201 - 203.(Yan Zhixin, Wu Delun, Wang Yi, et al. The study of blast vibration effect and safety[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2): 202 - 204.(in Chinese))
- [5] 谭忠盛, 杨小林, 王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(2): 281 - 285.(Tan Zhongsheng, Yang Xiaolin, Wang Mengshu. Effect of blast in double line tunnel on existing tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(2): 281 - 285.(in Chinese))
- [6] 刘亚群, 李海波, 赵 坚. 确定岩质边坡安全阈值的新方法[J]. *爆炸与冲击*, 2004, 24(5): 448 - 452.(Liu Yaqun, Li Haibo, Zhao Jian. A new method to determine safety threshold velocity of slope[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(5): 448 - 452.(in Chinese))
- [7] 李宏男, 王炳乾, 林 皋. 爆破地震效应若干问题的探讨[J]. *爆炸与冲击*, 1996, 16(1): 66 - 72.(Li Hongnan, Wang Bingqian, Lin Gao. Studies on some problems on explosion earthquake responses[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1996, 16(1): 61 - 67.(in Chinese))
- [8] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. *J. Soil Mech. and Foundations Div., ASCE*, 1973, 99(SM5): 421 - 427.
- [9] Itasca Consulting Group, Inc. *FLAC<sup>3D</sup>(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D) Version 2.10, Users Manual*[M]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.
- [10] 李廷春, 李术才, 邱祥波. 三维快速拉格朗日法在安全顶板厚度研究中的应用[J]. *岩土力学*, 2004, 25(6): 935 - 939.(Li Tingchun, Li Shucai, Qiu Xiangbo. Application of fast Lagrangian analysis of continua to researching on safe rock covers of Xiamen subsea tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 935 - 939.(in Chinese))
- [11] 朱维申, 李晓静, 郭彦双, 等. 地下大型洞室群稳定性的系统性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(10): 1 689 - 1 693.(Zhu Weishen, Li Xiaojing, Guo Yanshuang, et al. Systematical study on stability of large underground caverns[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1 689 - 1 693.(in Chinese))
- [12] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 利用FLAC<sup>3D</sup>分析某边坡的稳定性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2 730 - 2 733.(Liu Chunling, Qi Shengwen, Tong Liqiang, et al. Stability analysis of slope under earthquake with FLAC<sup>3D</sup>[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2 730 - 2 733.(in Chinese))
- [13] 董玉书, 徐友宁. 厂坝铅锌矿区民采开发引发的问题思考[J]. *华南地质与矿产*, 2002, (4): 23 - 27.(Dong Yushu, Xu Youning. Some problems resulted from disordered mining of lead-zinc ores in Changba orefield[J]. *Geology and Mineral Resource of South China*, 2002, (4): 23 - 27.(in Chinese))
- [14] 刘松伟, 尹贤刚, 陈黎明, 等. 厂坝铅锌矿 II#矿体过渡层的工程地质调查与评价[J]. *采矿技术*, 2003, 3(4): 1 - 4.(Liu Songwei, Yin Xiangang, Chen Liming, et al. Engineering geology research and evaluation of transitional layer of Changba lead-zinc orefield No.II mine[J]. *Mining Technology*, 2003, 3(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [15] 袁积余, 陈双世. 群采破坏后矿山的技术改造与可持续发展[J]. *矿业快报*, 2002, (3): 10 - 12.(Yuan Jiyu, Chen Shuangshi. Technical alteration and persistent development of mine after disordered mining destroy[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2002, (3): 10 - 12.(in Chinese))
- [16] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 厂坝铅锌矿岩石物理力学性质测试研究[J]. *矿业研究与开发*, 2003, 23(5): 12 - 14.(Yin Xiangang, Li Shulin, Tang Haiyan, et al. The tests and studies of physical mechanical properties of the rocks from Changba lead-zinc mine[J]. *Mining Research and Development*, 2003, 23(5): 12 - 14.(in Chinese))