

深部采场无底柱深孔后退式开采围岩力学响应特征

罗周全¹, 陈杰^{1,2}, 谢承煜¹, 汪伟¹, 秦亚光¹, 陈轶俊¹

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 中国人民解放军96317部队, 宜春 336000

摘要 运用Surpac和FLAC^{3D}组合建模技术建立深部矿区三维数值分析模型, 基于多元线性回归分析方法模拟反演出深部区域现存地应力场, 采用模型重构方法获取了采场及周边的局部地应力分布规律。研究某采场利用无底柱深孔后退式采矿方法开采的围岩力学响应特征, 结果表明: 1) 采场围岩的最大拉应力为0.40 MPa, 最大水平位移为28.2 mm, 出现在采场Y向中轴线附近南帮位置, 最大垂直位移为27.43 mm, 出现在Y向中轴线附近顶板位置, 采场围岩发生了一定范围的塑性破坏; 2) 采场Y向中轴线附近位置顶板位移较大, 应加强地压监测; 采场东头由于受到爆破积累损伤的影响, 在对东头侧向崩矿时, 要适当调整孔网参数; 采场南帮临近区域要增加预裂孔、减小单孔装药量及每段起爆药量, 防止爆破超挖矿柱, 影响整个盘区的稳定。

关键词 力学试验; 回归反演; 地应力场; 模型重构

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.012

Characteristics of mechanical response of surrounding rocks in deep hole pillarless retreating mining at deep stope

LUO Zhouquan¹, CHEN Jie^{1,2}, XIE Chengyu¹, WANG Wei¹, QIN Yaguang¹, CHEN Yijun¹

1. School of resources and Safety engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. 96317 Unit of People's Liberation Army, Yichun 336000, China

Abstract A three-dimensional numerical analysis model was developed using the complex geological modeling techniques, Surpac and FLAC^{3D}. The initial geo-stress field was obtained by using multiple linear regression method, and the distribution law of in-situ geo-stress field around the stope was obtained by geometric cross-scale model-building technology. On the basis of that, the characteristics of mechanical response of surrounding rocks in deep hole pillarless retreating mining at deep stope were studied. The results showed that: 1) The maximum tensile stress of 0.40 MPa and the maximum horizontal displacement of 28.2 mm were observed at south side of the stope near the Y-central axis. The maximum vertical stress of surrounding rocks was found to be significant at stope roof near the Y-central axis with the maximum value of 27.43 mm. Plastic failure occurred in these corresponding regions. 2) Field monitoring and security measures need to be strengthened near the Y-central axis. The hole net parameter needs to be adjusted in eastward lateral caving due to accumulated damage of blasting. In the south side of the stope, it is necessary to increase presplit holes and reduce single hole explosive load and the initiation dose of each segment to prevent the overbreak of the pillar to affect the stability of the entire extent.

Keywords mechanics test; regression inversion method; geo-stress field; model reconstruction

收稿日期: 2014-06-05; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAK9B02-05); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014zzts262)

作者简介: 罗周全, 教授, 研究方向为矿床深井开采与安全预警数字化理论与技术, 电子信箱: lzq505@hotmail.com

引用格式: 罗周全, 陈杰, 谢承煜, 等. 深部采场无底柱深孔后退式开采围岩力学响应特征[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 70-74.

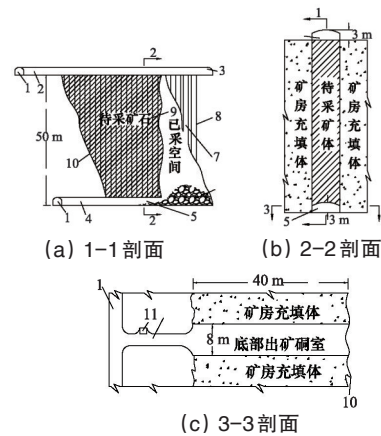
地下采场的稳定性直接影响地下采矿工程的安全性^[1]。尤其在开采进入深部时,由于深部采场地质构造复杂、岩层层理发育、地压活动频繁,并且采场的规模和形状要随矿体的形态而变化^[2],分析深部采场稳定性对于确保采矿工程的安全性具有重要意义。杨宇江等^[2]基于强度折减法分析了地下采场稳定性;徐文彬等^[3]采用厚跨比法、结构力学梁理论以及普氏拱理论对矿柱进行研究,获得嗣后采场破坏模型以及采场失稳演化过程;王新民等^[4]采用大型有限元分析软件 ANSYS 对采场顶板的稳定性及其对采场围岩力学状态的影响进行数值模拟、非线性分析。

当采场所处工程地质环境和地应力场复杂时,准确获取采场周边地应力场变化规律是从本质上对采场安全开采的探讨,本文对某深部采场无底柱深孔后退式开采围岩力学响应特征进行探索性研究。

1 工程概况

某大型铅锌矿山将标高在-360 m 以下区域定义为深部。其狮岭矿区深部主要矿体为 Sh214a 号矿体,主要赋存于 D₂d^b、D₃t^a 地层中,分布在-400~-600 m 水平。矿体下盘有一条 F₃ 大断层,是一条主要控矿的右行平行逆断层,走向北东 15°~25°,倾向 105°~115°。上下盘围岩较破碎,常见有牵引褶曲。另外,在地层中两种不同岩性的界面处,层间构造较发育,在围岩及矿体中发育了多组规模较小的小构造,多数小构造破碎带较松散。

该矿山对于矿房采场开采主要采用无底柱深孔后退式采矿方法(图 1)。底部结构为无底柱平底硐室,采用小孔径后退式崩矿,边孔实行竹筒间隔不耦合装药,遥控铲运机出矿,嗣后一次充填。采场一般东西布置,从西头开始拉底破顶,再进行侧向崩矿。采场宽度布置 8~12 m,长度和宽度根据矿体形态和地质条件变化。



1—沿脉无轨巷道;2—凿岩硐室进路;3—顶部凿岩硐室;4—出矿硐室进路;5—底部出矿硐室;6—矿堆;7—切割天井;8—残留炮孔;9—待爆炮孔;10—矿体边界;11—溜矿井;

图 1 采矿方法示意

Fig. 1 Schematic diagram of the mining method

2 试验研究

2.1 岩体参数获取

为了准确获取深部岩体相关参数,对与矿区深部岩体稳定性关系较为密切的 7 种主要岩性(包括 2 种矿体、4 种围岩和 1 种胶结充填体)的物理力学参数进行测试。通过试验,获得了矿岩的块体密度、纵波速度、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度、内聚力和内摩擦角等物理力学指标。通过 Hoek-Brown 法折算获取岩体抗压强度、岩体抗拉强度、变形模量。岩体力学参数中表征岩体抗剪强度参数的内聚力取 M. Georgi 法、费森科法和 Hoek-Brown 法三者的平均值,内摩擦角值取室内试验结果和 Hoek-Brown 法二者的平均值,结果如表 1 所示。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the rocks

岩石名称	岩体抗压强度/ MPa	岩体抗拉强度/ MPa	变形模量/ GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/ (°)	泊松比	块体密度/ (g·cm ⁻³)
D ₂ d ^a	6.58	0.472	12.40	0.5200	38.42	0.22	2.77
铅锌矿体	10.51	1.279	17.40	1.0070	37.14	0.25	3.46
黄铁矿	9.69	1.195	15.67	0.7760	37.67	0.22	4.59
D ₂ d ^b	3.74	0.389	9.18	0.4490	37.58	0.23	2.72
D ₃ t ^a	2.91	0.524	9.18	0.3840	37.89	0.25	2.70
D ₃ t ^b	2.71	0.475	9.18	0.4720	38.91	0.25	2.72
充填体	0.265	0.141	6.14	0.0047	34.41	0.21	1.72

参照相关研究成果^[5,6],本次分析结合三维数值模型构建技术,采用弱化带法处理矿区断层模型得到矿区中含有断层的区域的岩体力学参数。

2.2 地应力测量

为了获取深部矿区岩体的初始应力状态,对所研究区域

开展了现场应力测量工作。本次原岩地应力测量采用套孔应力解除法测定。测试主要仪器设备为高精度 LUT 岩石三轴地应力测定系统。

根据测量点布置要求和地质状况,结合现场施工条件,共布置 3 个地应力测点,如表 2 所示。测点的选择基本上避

开了巷道和采场等应力集中区以及断层、岩石破碎带、断裂发育带。通过LUT-str专用岩体应力计算软件综合计算得到

3个地应力测点的空间应力分量的计算结果列于表3中。

表2 测点坐标及布置情况

Table 2 Coordinates of the measuring points and exact location

测点编号	钻孔仰角 $I(^{\circ})$	钻孔方位 角 $I(^{\circ})$	钻孔孔口中心点坐标/m			测点具体位置
			x	y	z	
1号测点	7.0	155	8418.607	2644.008	-648.500	N3号穿脉,距离-650 m水平运输主巷约15 m处
2号测点	7.5	300	8254.220	2589.970	-648.800	S4号穿脉与S5号穿脉之间,沿脉大巷的西侧
3号测点	7.0	15	8353.579	2614.794	-548.600	N0号穿脉中,距离-550 m水平运输主巷约2 m处

表3 各测点应力分量计算结果表

Table 3 Calculation results for stress component of the measuring points

测点编号	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_z/MPa	τ_{xy}/MPa	τ_{yz}/MPa	τ_{zx}/MPa
-650 m-1 [#]	-21.41	-26.38	-21.13	5.04	2.63	8.28
-650 m-2 [#]	-22.54	-27.72	-20.36	6.78	9.19	3.13
-550 m-3 [#]	-17.87	-20.41	-18.79	7.71	3.93	9.17

3 矿区深部地应力场反演及模型重构

3.1 数值模型构建

根据矿山相关部门提供的矿区地形图、钻孔数据、中段平面图和穿脉剖面图等原始资料,在Surpac中建立了矿区深部的矿体、断层等实体模型和能反映出深部矿区地质特征和工程结构之间空间关系的矿区深部的块体模型。块体模型的范围为 $x(8100, 8600)$ 、 $y(2500, 2750)$ 、 $z(-700, -450)$,模型方位取0。然后根据Surpac和FLAC^{3D}组合建模技术建立深部矿区三维数值分析模型(图2),共划分246742个单元,选取能较好地描述岩体在塑性破坏阶段变形特性的理想弹塑性本构模型——Mohr-Coulomb屈服准则,计算区域边界采取相应的位移约束。

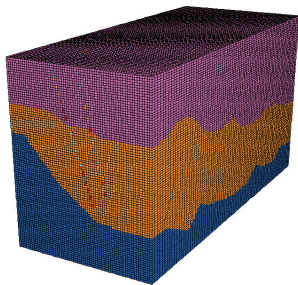


图2 三维数值分析模型

Fig. 2 3D numerical analysis model

3.2 多元回归反演过程分析

采用多元回归分析方法^[7,8]进行反演。回归方程为

$$\sigma_{jp} = L_0 + \sum_{i=1}^6 L_i \sigma_{ip}^i \quad (1)$$

式中, $p=1, 2, 3$,为测量点的序号; L_0 为常数, $j=1, 2, \dots, 6$,对应应力6个分量; L_i 为相应于自变量的多元回归系数; σ_{ip} 为第 p 测量点第 j 个分量的回归计算值; σ_{ip}^i 为采用FLAC^{3D}模拟获得的测量点的6个应力分量; σ_{jp} 和 σ_{ip}^i 为应力分量计算值的单列矩阵, n 为回归元素数。

根据探测数据可知,水平压应力与标高有关,可将其视为线性相关^[9]。因此,在模型各侧面施加梯形构造压应力,测试获取的3个剪应力 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} ,由于3个测点 τ_{xy} 值相近, τ_{yz} 、 τ_{zx} 中有两个值相近,可认为是深部长期开挖造成测量值出现“变异”,在计算时取另外两者的平均值。由此在模型侧面施加均匀的剪应力。通过多次反演拟合,调整相应边界条件,最终得到的基本应力场反演监测值如表4所示。

表4 各测点回归反演值

Table 4 Inversion values of the measuring points

项目	σ_x / MPa	σ_y / MPa	σ_z / MPa	τ_{xy} / MPa	τ_{yz} / MPa	τ_{zx} / MPa
回归值1	-22.55	-28.96	-20.99	8.24	2.94	8.84
回归值2	-22.58	-27.86	-18.88	5.20	3.70	7.59
回归值3	-15.75	-20.54	-20.20	7.90	2.52	9.43

运用SPSS软件进行线性回归分析得到矿区地应力回归方程待定系数($L_0, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6$)为(5.702, 1.238, 1.251, 0.932, 0.995, 0.500, 0.783),调整后的拟合优度 R^2 为98.7%,说明自变量可以解释因变量98.7%的变化,方差检验表中 F 值对应概率 P 值0.000小于显著度0.050,因此应拒绝原假设,说明自变量和因变量之间存显著线性关系。参数检验中 τ_{yz} 概率 P 值大于显著度0.050,说明其和因变量在总体中线性关系不明显。加载相应边界条件生成的初始地应力场云图如图3所示。表4所示为初始地应力场回归反演值。

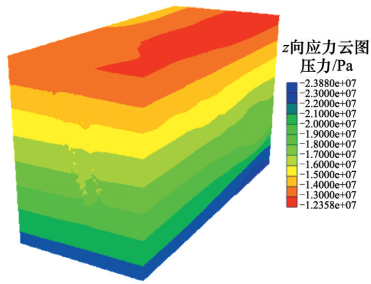


图3 矿区初始应力场

Fig. 3 Initial stress field of the mining area

3.3 地应力场重构

为研究深部采场围岩力学响应特性,精确反演采场及附近区域地应力场,需对采场的地应力场进行重构。选取该矿山狮岭矿区深部-550 m N5N#采场为研究对象。从采场回采爆破设计剖面图中提取采场上部硐室底板线、下部硐室顶板边界线和东西两端设计回采边界线,在Surpac中生成采场实体模型。根据模型大小,开挖范围的3~5倍作为边界尺寸^[10]。模型范围为 $x(8430, 8600)$ 、 $y(2674, 2734)$ 、 $z(-580, -470)$ 。将该区域的断层、矿体约束文件加载到采场块体模型上得到采场计算模型如图4所示。

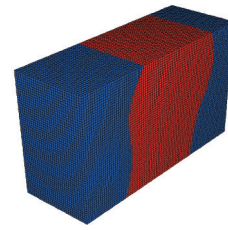


图4 重构三维数值分析模型

Fig. 4 Reconstruction of 3D numerical analysis model

根据采场模型的大小、形状和位置确定了3个监测点,用以进行反演的实测值是通过实测地应力场反演得到的监测值,如表5所示。按照深部地应力场反演方法反演采场初始地应力场。生成的初始地应力场如图5所示。

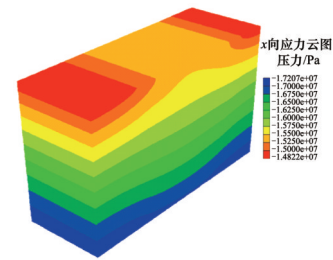


图5 重构模型初始应力场

Fig. 5 Initial stress field of the reconstruction model

表5 重构模型中各监测点坐标及反演值

Table 5 Coordinates and inversion values of the measuring points in the reconstruction model

监测点 编号	监测点坐标/m			σ_x /MPa	σ_y /MPa	σ_z /MPa	τ_{xy} /MPa	τ_{yz} /MPa	τ_{zx} /MPa
	x	y	z						
4	8562	2704	-525	-16.50	-18.89	-16.83	5.04	3.87	7.24
5	8520	2700	-510	-15.14	-16.49	-13.69	7.35	4.64	9.00
6	8482	2708	-540	-17.07	-20.00	-16.89	5.71	4.45	9.17

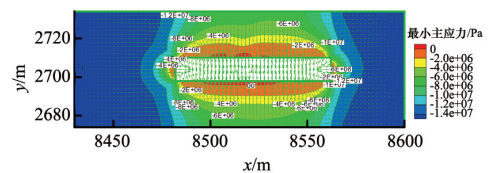
4 采场围岩力学响应特征分析

采场开挖是一个极其复杂的过程,目前还很难确定爆破过程的每一细节。无底柱深孔后退式采矿法通过在上部凿岩硐室钻凿向下大直径天井,采用球状药包自下而上逐层崩落矿石,直至破穿上部硐室形成落矿空间然后采用侧向崩矿的方法落矿,一般进行7次侧向崩矿。为准确反映落矿过程对采场围岩的影响,用FLAC^{3D}模拟对采场进行开挖时,按照每次崩矿量进行开挖,然后将爆破时产生的载荷简化为三角形脉冲加载到崩矿区域围岩上。爆破荷载压力上升时间 $t_1 = 100 \mu s$,下降时间 $t_2 = 500 \mu s$ 。作用在围岩上的径向应力和切向应力通过经验公式获取^[11]。

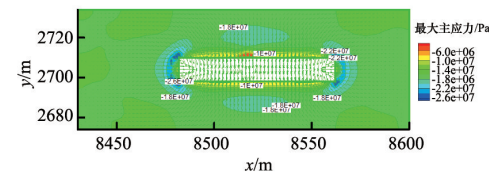
回采结束后采场围岩应力场重新分布,通过对计算模型进行剖面分析比较,为反映采场围岩的力学特性,在取剖面 $z=-530$ m水平和 $y=2704$ m处进行分析。

图6所示为采场开挖后-530 m水平主应力云图,通过分析可得应力场分布规律为:最小主应力范围为0.40~-14.9 MPa,最大主应力范围为-4.05~-25.6 MPa。采场围岩出现了

部分拉应力区,其中最大拉应力出现在采场南北两帮,其值为0.40 MPa。分析可得:采场东西两端应力分布以压应力为主,易出现压应力集中,采场围岩受挤压较严重,采场中轴线上易出现拉应力破坏。



(a) 最小主应力



(b) 最大主应力

图6 主应力分布

Fig. 6 Distribution of principal stress

由图7可知,采场位移场分布规律为:采场四周都发生了位移变化,距离采空区越远,位移值越小。 x 向水平位移范围为:0~27.40 mm。 y 向水平位移范围为:0~28.20 mm。采场围岩的 x 向最大水平位移为27.40 mm,出现在采场东头。采空区围岩的 y 向最大水平位移为28.20 mm,出现在采场南帮。在垂直方向上,顶板的最大位移值为27.43 mm,底板的最大位移值为15.85 mm,均出现在采场 y 向中轴线上。可得:采场 y 向中轴线附近位置南帮和顶板位移较大,易出现片帮和冒顶安全问题,在此处需优化炮孔设计,同时加强地压监测。

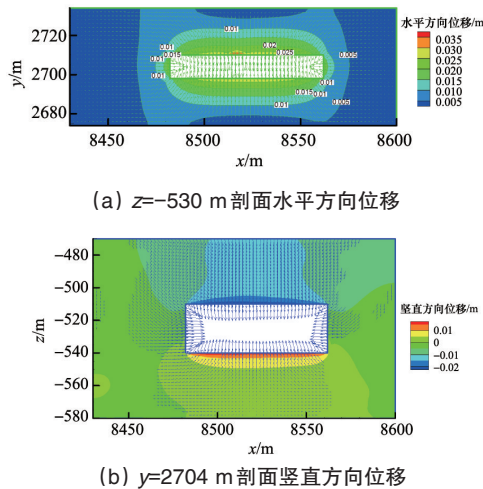


图7 位移等值线图

Fig. 7 Contour map of vertical displacement

由图8可知,在采场围岩四周形成一定范围的塑性破坏,产生的塑性区是由开挖时产生的冲击载荷和受到应力场挤压共同作用的结果。塑性区的分布规律为采场南帮塑性区体积比北帮大,东头塑性区体积比西头大。分析可得:采场东头由于受到爆破积累损伤的影响,必然产生塑性破坏增大,因而在对东头侧向崩矿时,要适当调整孔网参数;采场南帮临近区域要增加预裂孔、减小单孔装药量及每段起爆药量,防止爆破超挖矿柱,影响整个盘区的稳定。

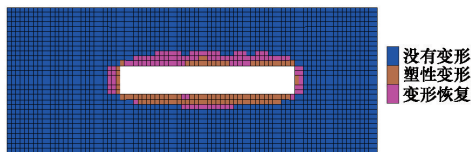


图8 塑性区分布

Fig. 8 Plastic zone distribution

5 结论

1) 在室内岩石力学试验的基础上运用折减算法获得岩体力学参数,现场地应力测量获得矿区原岩地应力参数,利用回归反演的方法揭示了矿区深部现存地应力场的三维分布特征,通过空间重构方法还原了采场局部现存地应力场,以此为基础通过模拟无底柱深孔后退式采矿法分析了采场的围岩力学特性。

2) 基于数值研究揭示了采场围岩的应力分布规律,从而为采场设计、开采提供相应技术支持,为矿山深部矿体安全高效开采提供有益借鉴。

3) 采场中位移较大和应力集中的位置需优化爆破设计,适当调整孔网参数,同时加强地压监测,防止爆破超挖矿柱,影响整个盘区的稳定。

参考文献 (References)

- [1] 董金奎, 冯夏庭, 张希巍, 等. 地下采场破碎岩体稳定性评价与参数优化[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(9): 1322-1326.
Dong Jinkui, Feng Xiating, Zhang Xiwei, et al. Stability evaluation and parameter optimization on the fractured rock mass around underground stope[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2013, 34(9): 1322-1326.
- [2] 杨宇江, 庄文广, 王照亚, 等. 李元辉基于强度折减法的地下采场稳定性分析[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 864-867.
Yang Yujiang, Zhuang Wenguang, Wang Zhaoya, et al. Stability analysis of underground stope based on strength reduction theory[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2011, 32(6): 864-867.
- [3] 徐文彬, 宋卫东, 杜建华, 等. 崩落法转阶段嗣后充填法采场稳定性分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 416-422.
Xu Wenbin, Song Weidong, Du Jianhua, et al. Stability analysis of a backfill stope due to transforming from block caving to stage backfill[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(4): 416-422.
- [4] 王新民, 王长军, 张钦礼, 等. 基于ANSYS程序下的采场稳定性分析[J]. 金属矿山, 2008(8): 17-20.
Wang Xinming, Wang Changjun, Zhang Qinli, et al. ANSYS based stability analysis of stope[J]. Metal Mine, 2008(8): 17-20.
- [5] 李远耀, 殷坤龙, 代云霞. 基于广义Hoek-Brown准则强度折减法的岩体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 28(增1): 347-352.
Li Yuanyao, Yin Kunlong, Dai Yunxia. Stability analysis of rock slope by strength reduction method based on generalized Hoek-Brown failure criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(Suppl 1): 347-352.
- [6] 杨泽, 侯克鹏, 李克钢, 等. 云锡大屯锡矿岩体力学参数的确定[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1923-1928.
Yang Ze, Hou Kepeng, Li Kegang, et al. Determination of mechanical parameters of rock mass from Yunxi Datun Tin mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1923-1928.
- [7] 侯明勋, 葛修润. 岩体初始地应力场分析方法研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1626-1630.
Hou Mingxun, Ge Xiurun. Study on fitting analysis of initial stress field in rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1626-1630.
- [8] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64-75.
Guo Huaizhi, Ma Qichao, Xue Xicheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 64-75.
- [9] 刘泉声, 刘恺德. 淮南矿区深部地应力场特征研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2089-2096.
Liu Quansheng, Liu Kaide. Characteristics of in-situ stress field for deep levels in Huainan coal mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2089-2096.
- [10] 孙礼健, 朱元清. 初始地应力场分析方法的研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2008, 29(3): 14-21.
Sun Lijian, Zhu Yuanqing. The research progress on numerical analysis method of initial geostress[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2008, 29(3): 14-21.
- [11] 石洪超, 丁宁, 张继春. 爆破动力作用下小净距隧道围岩振动效应分析[J]. 爆破, 2008, 25(1): 74-78.
Shi Hongchao, Ding Ning, Zhang Jichun. Analysis of vibration effects on surrounding rock for small clear distance tunnel under the dynamic action of blasting[J]. Blasting, 2008, 25(1): 74-78.
- [12] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于Surpac的复杂地质体FLAC^{3D}模型生成技术[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1334-1338.
Luo Zhouquan, Wu Yabin, Liu Xiaoming, et al. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on Surpac[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1334-1338.
- [13] Badr A, Ashraf A F, Platten A K. Statistical variations in impact resistance of polypropylene fibre-reinforced concrete[J]. International of Journal of Impact Engineering, 2006, 32(11): 1907-1920.

(责任编辑 吴晓丽)