

文章编号: 1673-3363-(2013)06-0874-06

高陡边坡下充填法开采挂帮矿稳定性 数值模拟与安全监测

吴珊¹, 宋卫东¹, 杜建华¹, 张兴才², 周家祥²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 武汉钢铁集团矿业有限责任公司, 湖北 武汉 430080)

摘要 充填法开采挂帮矿不但可以充分回采矿石, 而且可以有效地防止边坡下滑和控制采场围岩变形。以武钢大冶铁矿尖山挂帮矿体采用充填法开采为工程背景, 运用 CMS 三维空区探测系统对原有空区进行探测, 通过 CMS 及 3D mine-FLAC^{3D} 耦合的方法对开采充填过程中采场围岩及露天边坡的应力、位移和塑性变形进行了数值模拟计算分析, 提高了数值模拟的可靠程度。计算结果表明, 采空区的充填可有效地控制围岩及露天边坡的变形, 实现安全开采。在挂帮矿体开采过程中, 建立应力、断面收敛及全站仪联合监测网, 对采场围岩、矿柱及边坡的位移、应力变化进行实时监测, 监测结果与数值模拟计算结果基本一致。

关键词 挂帮矿; 高陡边坡; 空区探测系统; 数值模拟; 监测

中图分类号 TD 823

文献标志码 A

Stability of numerical simulation and security monitoring of filling method to mining the hanging wall ore on high-steep slope

WU Shan¹, SONG Wei-dong¹, DU Jian-hua¹, ZHANG Xing-cai², ZHOU Jia-xiang²

(1. Civil and Environmental Engineering School, State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Wuhan Iron & Steel Group Mining Co. Ltd, Wuhan, Hubei 430080, China)

Abstract Exploitation of hanging wall ore with filling method can not only recycle ore, but also avoid decline of the slope and control deformation of surrounding rock effectively. Based on the hanging wall ore mining by filling method of Daye Iron Mine, Cavity Monitoring System (CMS) is used in this paper to detect the original goaf of hanging wall ore. Then stress, displacement and plastic deformation of surrounding rock and open-pit slope in the processing of mining the hanging wall ore are analyzed by CMS and 3D mine-FLAC^{3D} coupled method. The calculation results show that the surrounding rock and open-pit slope deformation can be controlled by filling the goaf effectively, so that the hanging wall ore can be mined safely. In the process of mining the hanging wall ore, monitoring network containing stress, fractures convergence and total station is established to monitor real-timely the displacement and stress changes of the surrounding rock, the pillar and the slope. The monitoring results are generally in agreement with the numerical simulation.

收稿日期: 2012-08-13

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0950); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-SD-12-003A); 教育部博士点基金项目(20120006110022)

作者简介: 吴珊(1989-), 女, 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 从事岩石力学方面的研究。

通信作者: 宋卫东

E-mail: songwd@ustb.edu.cn

Tel: 010-62333864

Key words hanging wall ore; high steep slope; CMS; numerical simulation; monitoring

近年来,随着大型露天矿开采的深入,露天坑深度逐渐增加,剥采比增大,矿石开采成本不断提高,越来越多的大型露天矿转入地下开采,如石人沟铁矿、大冶铁矿、峨口铁矿等^[1-3]。挂帮矿是指露天境界内开采矿体在境界外延伸的部分矿体,在露采时期大规模的开挖对周围岩体造成较大应力扰动,而且在坑底坡脚处形成应力集中,对挂帮矿的开采将形成更加复杂的次生应力场,引起边坡围岩的进一步变形和破坏,甚至出现滑坡失稳和巷道变形破坏等工程灾害^[4-6]。在露天转地下时对挂帮矿的高效开采对于缓解矿山短时间内转产及安排大量闲置职工的压力,具有一定的经济效益和社会效益。

采用充填采矿法回采挂帮矿不但可以充分回收矿石,而且可有效防止边坡下滑,控制采场围岩变形,从根本上解决挂帮矿开采过程中的安全技术问题。但充填法开采过程中,在一定时期内会存在采空区,成为造成边坡失稳的安全隐患。掌握采空区的空间形状及位置是进行采空区稳定性分析的关键^[7]。此外,在开采过程中对露天边坡及采场围岩的稳定性进行现场实时监测,可以对危险情况做出预测,以便及时采取相应措施,控制采场及边坡的变形和破坏,保证生产的安全^[8-9]。

本文采用 CMS 空区探测系统,对武钢大冶铁矿挂帮矿体前期开采过程中形成的采空区进行探测,采用 CMS 及 3D mine-FLAC^{3D} 耦合的方法对挂帮矿体采用充填法开采对高陡露天边坡及采场围岩稳定性的影响进行分析,同时结合开采过程中现场监测结果,指导挂帮矿体安全高效开采。

1 挂帮矿体开采现状

大冶铁矿挂帮矿体位于尖山东露天坑底坡脚处(图1所示),赋存标高-144~-156 m,矿体为条带状,走向基本平行于边坡坡面,坡体上方的 F13 断层成为其开采时所面临的重大安全隐患。

挂帮矿体的开采经历了以下几个时期:1) 2001 年,扩帮开采,形成了边坡角 53°的高陡边坡;2) 2006 年,浅孔留矿法回采,在-144 m 水平内部形成了一个高 13 m、面积 1 202 m²的大空场,并留有不规则矿柱;3) 由于挂帮矿体仍剩余平均品位达 48% 以上的高品位铁矿石约 12 万 t,2009 年采用上向水平分层胶结充填法进行矿石回收。

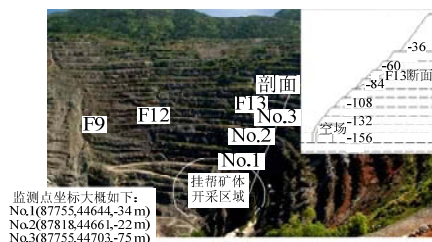


图1 露天坑全景及边坡监测点布置

Fig.1 Open-pit panoramic and monitoring points arrangement of slope

2 采空区探测及实体模型构建

2.1 采空区探测

三维空区激光探测是利用激光的高度精确性对地下采空区的大小和位置进行三维探测,能快速而准确地探测出采空区形态,并可以进行空区动态监测。目前主要以三维空区激光精密探测系统(CMS)和空区自动扫描激光系统(C-ALS)为主^[10-11]。本文采用 CMS 空区探测系统对挂帮矿体-144 m 水平的空区进行探测,采用 CMS 自带数据处理程序及 3D mine 软件进行可视化处理。

2.2 采空区实体模型构建

通过 3D mine 软件的实体和块体建模功能,得到挂帮矿体-144 m 水平采空区的空间形状、边界情况、与露天边坡的空间关系等。采空区底部的长度最大达 40 m,最大宽度 30 m,最小宽度 20 m,面积 700 m²,最大高度达 15 m,采空区体积 8 713 m³。

3 采空区及边坡稳定性数值模拟

应用 CMS 空区探测系统,精确地获取地下矿山采空区的三维形态和准确的空间位置,并借助大型三维矿床软件 3D mine 建立起空区的三维形态模型,通过耦合方法实现在 FLAC^{3D} 中生成能准确反映空区和围岩地质结构及岩性条件的数值模型,简化复杂空区稳定性计算的结果,可提高准确性和可靠性^[12-13]。采用 FLAC^{3D} 对挂帮矿充填法开采及回填过程进行模拟,以分析挂帮矿开采对高陡露天边坡及采场围岩稳定性的影响。

3.1 模型建立

利用采空区 CMS 实测结果,将数据导入到 3D mine 软件中,建立露天边坡及空区的 FLAC^{3D} 三维计算模型。模型大小为 X 方向 230 m, Y 方向 190 m,截取 0 m 到-200 m 水平。位移边界条件设定为 4 个侧面进行固定约束,底面全约束,露天地表为自由

面。本构模型设置为摩尔-库仑模型求解，得到最终的初始应力场。

岩体当前特性是整个开采过程中的一个过渡状态，它既是对过去每个开采时期岩体应力扰动状况叠加后的综合反映，也将对后续开采条件产生很大影响，为此，开挖过程尽量与现场实际相符，初始应力场形成后，首先开采边坡至矿房的巷道，再对矿房进行开采。回采步骤如下：回采-144 m 水平矿房→分步回采-156 m 水平矿房→一次回填-156 m 水平矿房，-156 m 水平预留宽为 4 m 的矿柱及厚度为 2 m 的顶板。

3.2 计算力学参数

模型计算中岩体主要包括铁矿体、花岗岩、充填体，其主要力学参数如表 1 所示。采用全尾砂-胶骨料胶结充填，料浆浓度为 65%，灰砂比为 1：8。岩体的抗压强度需要用点荷载抗压强度转换，先从点荷载抗压强度转换为饱和单轴抗压强度，见公式(1)，再从饱和单轴抗压强度通过岩体完整系数转换为岩体抗压强度^[6]。

$$\sigma_c = 22.82 I_{s(50)k}^{0.75} \tag{1}$$

式中： σ_c 为饱和岩体抗压强度； $I_{s(50)k}$ 为修正后的标准试件点荷载强度；准岩体抗压强度 $\sigma_{mc}=K\sigma_c$ ， K 为岩体完整系数。

表 1 岩体力学计算参数
Table 1 Rock mechanical properties

参数	容重/ (kN·cm ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	σ_{mc} /MPa	内聚力/ MPa
铁矿体	40.3	15.23	0.31	87.11	0.33
花岗岩	25.5	17.96	0.27	99.75	0.48
充填体	21.3	12.11	0.23	2.3	0.40

3.3 数值计算结果分析

针对空区的关键区域，分别选取最危险截面(采空区的长轴方向)切割剖面 I 及矿柱位置切割剖面 II，如图 2 所示，分析空区周边围岩移动和应力场分布特性。

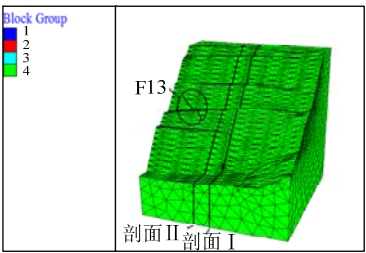


图 2 FLAC^{3D} 计算模型及剖面位置
Fig.2 Computing model of FLAC^{3D} and profile position

1) 应力分布规律分析

回采充填过程中应力分布如图 3 所示。

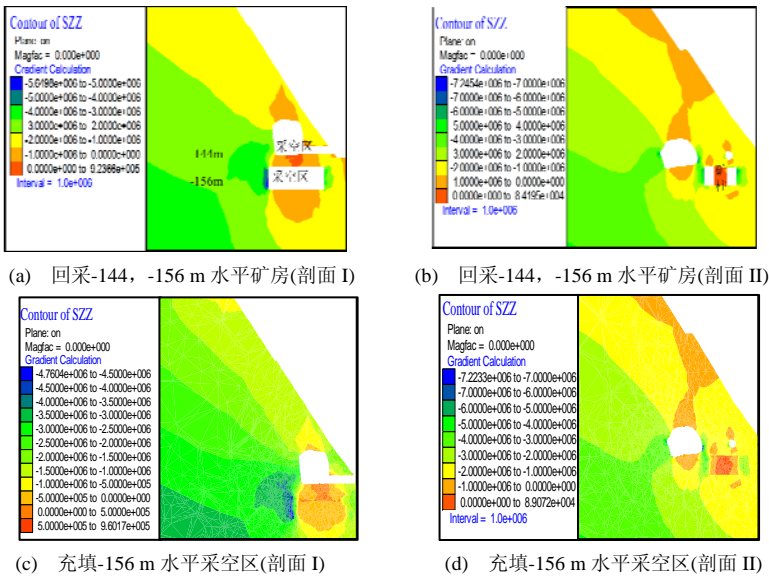


图 3 采空区应力云图
Fig.3 Stress contours of the goaf

从图 3 中可以看出：当-144 m 及-156 m 水平矿房开采完成后，空区顶板、空区入口巷道处及-156 m 水平矿柱出现了明显的应力释放，空区边帮围岩出现了应力集中，-156 m 水平空区围岩应力达 5.9

MPa；-156 m 水平空区充填后，空区围岩应力为 4.7 MPa，降低了 1.2 MPa，说明采空区充填后充填体可以改善顶板应力分布；采空区充填后，充填体内部应力数值与采空区围岩应力相近，数值均在 1.0

MPa 左右,说明充填体对围岩支撑性良好;开采充填前后, -144 m 水平空区围岩应力基本保持在 3.0 MPa, 变化较小, 局部出现应力集中现象。

2) 位移变化规律分析

回采充填过程中位移变化如图 4 所示。

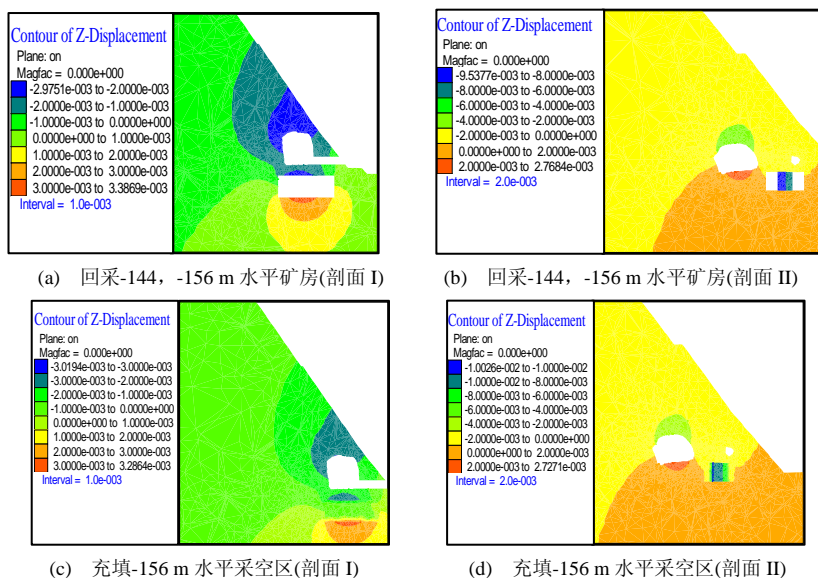


图 4 采空区位移云图

Fig.4 Displacement contours of the goaf

从图 4 可以看出: 挂帮矿体的回采造成围岩顶板处出现 3 mm 的最大竖向位移, 由于应力的释放, 底板也出现了约 3 mm 向上的位移, 底鼓现象明显, 两处围岩位移关于采空区水平中心线呈拱形对称分布; 矿房回采过程中, -156 m 水平矿柱由于承载上覆岩体的压力, 位移变化较大, 出现约 9.5 mm 的压缩变形; 采空区充填后, -144 m 水平采空区底

板位移降为 2 mm, 顶板位移基本不变, 同时, 由于充填体的支撑作用, -156 m 水平矿柱压缩变形减小, 约为 8~9 mm; 挂帮矿体的回采对露天边坡的影响基本在 3 mm 范围以内。

3) 塑性区破坏分析

回采充填过程中塑性区如图 5 所示。

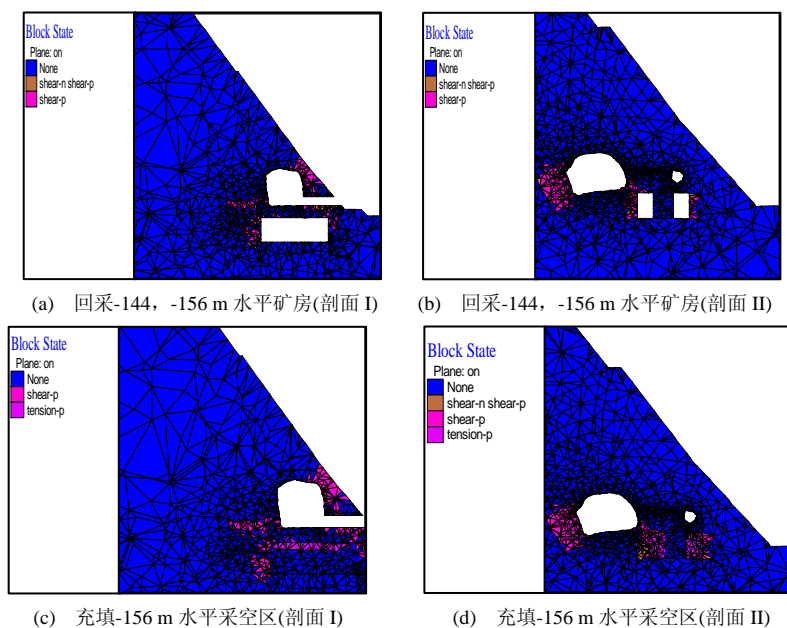


图 5 塑性区破坏图

Fig.5 Damage of plastic zone

从图 5 可以看出：在应力集中和位移最大的地方出现了塑性区域，主要表现为剪切破坏。采空区充填后，充填体内存在拉伸破坏。由于挂帮矿体的回采，-144 m 水平采空区与露天边坡间出现了剪切破坏，-156 m 水平采空区充填后，剪切破坏未出现增大趋势，但为确保露天边坡的稳定，建议及时充填 -144 m 水平采空区。

4 现场监测

4.1 监测方案设计

为确保挂帮矿安全开采，开采过程中通过断面收敛和应力监测 2 种手段在 -144 m 水平采场围岩及矿柱建立监测网，在回采充填过程中多次采样，进行全方位实时监测^[14]，同时在露天边坡采用全站仪对不稳定地段(F13 断层附近)的变形进行监控，布置 No.1, No.2 和 No.3 监测点，位置及坐标如图 1 所示。

图 6 为应力及位移监测点布置图，应力监测采用 KSE-II-1 型钻孔应力计，监测重点是采场外侧坡脚支撑矿柱和 -144 m 水平采场中央支撑矿柱，分别在以上 2 个位置设置应力监测点，埋设于矿柱中心位置，深度约为 2.5~3.0 m。位移监测采用 JASS30 数显收敛计，布置 4 个监测点。

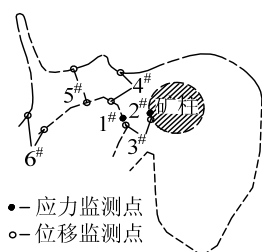


图 6 -144 m 水平应力及位移监测点布置

Fig.6 Location of monitoring points for horizontal stress and displacement deformation in the -144 m mining level

4.2 监测结果分析

1) 应力监测结果分析

通过多次采样，得到了各监测点应力值，应力值与监测时间为非线性关系。常用的非线性回归方法有幂函数回归、指数回归、对数回归、双曲线回归、抛物线回归以及多形式回归，采用 origin 数据处理软件分别得到了 1[#], 2[#] 监测点的非线性拟合曲线及回归公式^[15]：

1[#] 监测点的应力与监测时间的关系符合指数递减函数：

$$y = 0.76442e^{-x/16.94709} + 3.05256 \quad (2)$$

2[#] 监测点的应力与监测时间的关系符合 Bidoseresp 函数：

$$y = 2.481 + 0.462 \left[\frac{0.01778}{1 + 10^{2.149 \times 10^{-13} x}} + \frac{0.98222}{1 + 10^{3.865 - 0.031x}} \right] \quad (3)$$

式中：x 为监测天数；y 为监测点应力值。应力监测曲线拟合如图 7 所示，1[#], 2[#] 应力拟合曲线的 R-Square 值分别为 0.92, 0.85, 1[#] 监测应力拟合曲线与数据点拟合度较好，2[#] 相对较低，是由于在钢弦应力计安装完成后，应力监测值需要一段时间才能够稳定。由拟合曲线可知，当监测天数 x 增大时，1[#] 监测点应力值趋近于 3.05 MPa, 2[#] 监测点应力值趋近于 2.94 MPa, 与数值计算结果相吻合。由此说明，挂帮矿体的开采对围岩的稳定性影响不大。建议在后期开采时，确保充填体达到预期强度后再回收矿柱及顶底板，并加强后期监测，以得到围岩矿柱的稳定情况，确保安全开采。

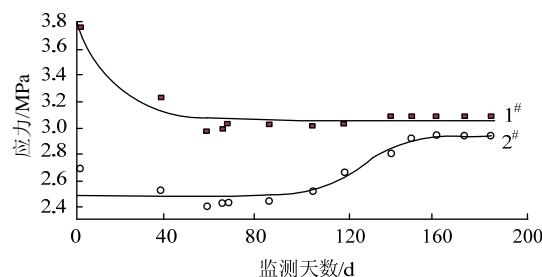


图 7 应力监测曲线图

Fig.7 Monitoring curves of horizontal stress

2) 位移变形监测结果分析

从图 8 可看出，各监测点位置不同，变形量也不同：3[#] 点位移变化最大，最大幅度达 8.39 mm，其原因是该点位于矿柱上的监测点，由于矿柱承受应力较大，且矿区作业仍在进行，随着矿柱及围岩应力的不断变化，矿柱必然发生较为明显的位移变形；4~6[#] 点主要布置在采场围岩，位移变化较小，波动幅度基本在 0~1.5 mm 内，且随着时间的增加，变形曲线趋于平稳。总体看来，位移变形变化不大，且随着采矿作业活动的减少，变形趋于稳定。

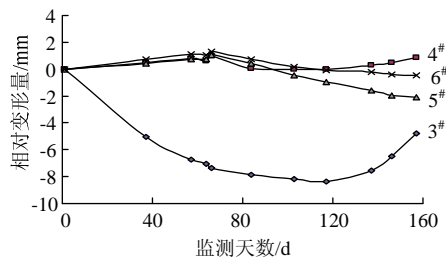


图 8 -144 m 水平位移监测曲线

Fig.8 Monitoring curve of displacement for the -144 m mining level

3) 边坡监测结果分析

通过开采过程中的多次取样,得到各监测点的位移变化值。以最靠近挂帮矿体的 No.1 号监测点为例进行分析,如图9所示,回采矿房期间, No.1 点位移值在近一年间增大约 2 mm。采空区充填后,边坡位移增大的速率逐渐减缓,趋于稳定。开采期间, No.1 点位移值最终增大约 3 mm,与数值计算结果一致。因此可以认为,采空区的充填有效地控制了边坡的变形,减小了挂帮矿的开采对边坡稳定性的影响。

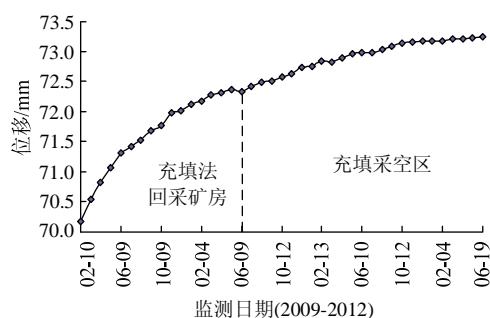


图9 边坡监测位移变化曲线

Fig.9 Monitoring curve of displacement for slope

5 结 论

1) 利用 CMS 实测结果,建立 FLAC^{3D} 模型,模拟挂帮矿体开采、回填过程。-156 m 水平采空区充填后,空区围岩应力降低了 1.2 MPa,充填体内部应力数值与采空区围岩应力相近,数值均在 1.0 MPa 左右,说明充填体对围岩支撑性良好。挂帮矿体的回采对露天边坡的影响基本在 3 mm 范围以内,但在-144 m 水平空区与露天边坡间出现了剪切破坏,-156 m 水平采空区充填后,剪切破坏未出现增大趋势,但为确保露天边坡的稳定,建议及时充填-144 m 水平采空区。

2) 巷道断面收敛、矿柱应力及边坡全站仪监测结果表明,采用上向水平胶结充填法对挂帮矿体开采,矿柱及围岩的应力较稳定,随开采的进行,应力保持在 3.0 MPa 左右。围岩及边坡位移变化不大,且随着采矿作业活动的减少,变形趋于稳定。监测结果同数值模拟计算结果基本一致。

3) 自 2009 年采用充填法开采以来,回收平均品位 48% 以上的高品位铁矿石 10 万 t,回收率达 93%,目前仍剩余 2 万 t 矿量。

4) 由于挂帮矿体围岩以花岗岩为主,且矿岩性质较好,水对围岩稳定性影响较小,故在数值模拟计算中未予以考虑。挂帮矿体目前还在开采,因此

还需继续定期对各监测点进行监测,采空区形成后应及时回填,待充填体达到要求强度后再回采矿柱及顶底板。

参考文献:

- [1] 程文文,宋卫东,张兴才,等.高陡边坡下开采挂帮矿对滑体稳定性的影响[J].煤炭学报,2011,36(3): 377-382.
CHENG Wen-wen, SONG Wei-dong, ZHANG Xing-cai, et al. The influence of landslide stability on mining hanging wall ore under the high and steep slope[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 377-382.
- [2] 李富平,李闻杰,南世卿,等.石人沟铁矿露天边坡残采后稳定性分析[J].矿业研究与开发,2010,30(1): 9-11.
LI Fu-ping, LI Wen-jie, NAN Shi-qing, et al. Study on the stability of the residual open-pit slope in Shirengou iron mine[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(1): 9-11.
- [3] 梁庆壮.浅谈露天转地下开采挂帮矿体的回收[J].矿业工程,2010,8(6): 21-22.
LIANG Qing-zhuang. Recovery of slope-coupling ore body in the case open pit mine changes into underground mine[J]. Mining Engineering, 2010, 8(6): 21-22.
- [4] 江兵,吴姗.大冶铁矿挂帮矿开采方法及对滑体稳定性的影响[J].金属矿山,2011(10): 48-50.
JIANG Bing, WU Shan. Study on the mining method for hanging wall ore in Daye iron mine and its impact on stability of landslide[J]. Metal Mine, 2011(10): 48-50.
- [5] 蔡路军,马建军,江兵,等.高陡边坡下采矿安全问题分析探讨[J].矿业快报,2006,25(3): 33-35.
CAI Lu-jun, MA Jian-jun, JIANG Bing, et al. Analysis and discussion on mining safety problem under high and steep slope[J]. Modern Mining, 2006, 25(3): 33-35.
- [6] 宋卫东,杜建华,杨幸才,等.深凹露天转地下开采高陡边坡变形与破坏规律[J].北京科技大学学报,2010,32(2): 145-148.
SONG Wei-dong, DU Jian-hua, YANG Xing-cai, et al. Deformation and failure of a high steep slope due to transformation from deep open-pit to underground mining [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(2): 145-148.
- [7] 刘晓明,罗周全,杨承祥,等.基于实测的采空区稳定性数值模拟分析[J].岩土力学,2007,28(增刊): 521-526.
LIU Xiao-ming, LUO Zhou-quan, YANG Cheng-xiang, et al. Analysis of stability of cavity based on cavity monitoring[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (Supp): 521-526.

(下转第 885 页)