

硬岩矿深部开采过渡区厚度优选与数值分析

刘敦文¹, 褚夫蛟^{1,2}, 任高峰², 吴迪²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖南武汉 430070)

摘 要: 针对某铁矿进入深部开采过程中采场出现的地压问题, 优化并选取了合理的采场参数. 考虑到矿体中存在软弱夹层, 会对过渡区的稳定性造成影响, 通过极限平衡法, 决定采用 8.5、10 及 12 m 厚度的过渡区以备选用, 运用大型数值分析软件 FLAC 3D 进行三维数值模拟, 对其稳定性进行对比分析. 结果表明, 随着厚度的增加, 过渡区中应力集中现象越来越小, 在开挖过程中, 顶板位移也随着厚度的增加而减小, 仅 12 m 厚过渡区的塑性区没有贯通. 所以留设 12 m 过渡区可保证采场的稳定, 满足过渡期间安全生产的要求, 为矿山的安全平稳过渡生产提供依据.

关 键 词: 深部开采; 软弱夹层; 采场参数; 过渡区厚度; 数值分析

中图分类号: TD 327

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)04-0571-05

Optimization of Transition Zone Thickness and Numerical Analysis for Deep Hard-Rock Mining

LIU Dun-wen¹, CHU Fu-jiao^{1,2}, REN Gao-feng², WU Di²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China. Corresponding author: CHU Fu-jiao, E-mail: 453949192@qq.com)

Abstract: Aiming at the ground control problem during underground stoping at deep iron mine, some reasonable stope parameters were chosen and optimized. In consideration of weak intercalated layer would influence the stability of transition zone, 3 kinds of alternative thickness of the transition zone which were 8.5, 10 and 12 m were selected by using limit equilibrium method. Besides, three-dimensional numerical model was established with the large-scale numerical analysis software FLAC 3D, which was used to make a comparative analysis of its stability. Numerical results showed that the stress concentration during the process of mining becomes less obvious and the displacement of roof decreases with the increasing thickness of transition zone, and the plastic zone at only 12 m thickness of transition zone has not been connected. It follows that 12 m transition zone can guarantee stope stability, and satisfy safety production requirements during the transition period, which provides basis for the safe production of mine transition.

Key words: deep mining; weak intercalated layer; stope parameters; thickness of transition zone; numerical analysis

随着矿山开采规模的扩大及浅部资源的日益枯竭, 矿山开采转入深部的趋势日益加强. 地下矿山进入深部开采后, 随着开采深度的逐年增加, 采场的地压问题将会越来越严重^[1]. 为了维持采场的安全稳定, 需要改变地下采场的采矿方法^[2],

并在上下相邻的不同采矿方法的采场间留设过渡区^[3] (隔离矿柱、保安矿柱等). 这样不仅可以减轻浅部矿体的开采对深部的扰动, 也可以减弱深部采场因地压问题所带来的影响, 从而使得浅部与深部的开采工作能顺利衔接, 同时进行, 对矿山

收稿日期: 2014-04-23

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(50490274); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ3030); 中南大学前沿研究计划项目(2010QZZD001).

作者简介: 刘敦文(1971-), 男, 湖南祁东人, 中南大学教授, 博士生导师.

生产起到维稳的作用并保证经济效益. 国内外许多矿山在转入深部开采的过程中都采取了留设过渡区的措施, 比如谦比希铜矿在浅部转深部开采的衔接部位留设隔离矿柱来满足矿山生产的平稳过渡^[4]; 新龙矿业留设保安矿柱用来隔水^[5]; 龙桥铁矿为保证下部开采的安全进行留设隔离矿柱^[6]; 桓仁铅锌矿保证下部开采的安全正常进行采用留设隔离矿柱的方案来隔离上部采空区^[7]; 石人沟铁矿在露天转地下开采中留设隔离矿柱保证矿山安全生产^[8]; 安庆铜矿进入深部开采为了保证深部回采的安全留设隔离矿柱^[9]. 过渡区的稳定性对深部开采有着重要影响^[4,10], 因此对其厚度的确定也至关重要. 如果过渡区留设过薄, 则不能保证深部矿山生产的安全, 一旦发生垮落, 将会给矿山企业带来灾难性后果; 如果过渡区留设过厚, 在后期回采的过程中, 会消耗大量的人力物力, 并且还会出现回采矿石损失贫化大的现象, 对矿山企业造成损失.

1 某硬岩矿采场参数优化

1.1 工程概况

某铁矿在露天开采结束后转入地下开采, 采用无底柱分段崩落法, 由于矿床位于裂隙破碎带中, 矿岩稳定性差. 随着开采深度的日益增加, 深部的矿压显现规律及地质作用特征使得浅部开采条件下所沿用的采矿方法已经明显不适用于深部开采. 为了改善深部开采的技术条件, 提高矿石开采的回采率, 充分回收资源, 提高经济效益, 决定在深部采用充填采矿法采矿.

矿山转入深部开采后, 由于采矿方法的转变, 使得开采工艺产生很大差别. 为了减小浅部与深部开采相互间的影响, 需要在上下采用不同采矿方法的采场间布置具有一定厚度的过渡区, 并需要保证其稳定. 过渡区的稳定会影响到整个采场的安全, 对矿山安全、顺利、高效的生产有着重大意义.

矿区矿体总体走向 SE120°, 走向长约 5.7 km. 内分布多个矿体, 多数矿体倾向 SW. 上盘为闪长岩, 下盘为第五段大理岩或白云质大理岩. 个别矿段矿体倾向 NE, 上盘为第五段大理岩和白云质大理岩, 下盘为闪长岩. 研究区域总体倾向 SW, 倾角约 55°, 倾斜延深约 1 200 m. 在矿体内部有厚约 2 m 的软弱夹层, 倾角约 50°.

1.2 深部采场参数优化

矿山以 -180 m 水平为分界线, 以上矿体为浅部矿体, 以下为深部矿体. 浅部矿体的平均厚度

为 40 m, 深部矿体的平均厚度为 28 m. 过渡区设计布置在 -180 m 水平. 因矿区决定在转入深部开采后采用上向水平分层充填采矿法开采, 根据设计要求^[11], 若矿体厚度大于 15 ~ 20 m, 则矿房垂直矿体走向布置, 一个采区设置 3 ~ 5 个采场. 由于矿山 -180 m 水平以下矿体平均厚度为 28 m, 因此设计采用矿房垂直矿体走向布置, 每个采区设计 5 个矿房, 以此来减小采准切割的工程. 上向水平分层充填采矿法要求矿房和矿柱的宽度分别为 8 ~ 10 m 和 6 ~ 8 m^[12], 查阅各矿山的采场参数, 部分矿山所选取的宽度大于设计要求. 根据矿山的具体情况, 结合生产实际, 并本着研究从极限角度出发的思想, 选取矿房矿柱的宽度均为 10 m.

2 过渡区厚度的优选确定

过渡区的厚度对于矿山由浅部顺利转入深部至关重要. 影响其安全性的因素主要有采场围岩、上覆岩体、过渡区自重等. 根据力学的相关原则, 结合岩石的物理特征、力学性质、岩体结构等因素, 同时依据矿山现状, 选取极限平衡法^[4,13]对过渡区的极限厚度进行估算分析.

综合上覆岩体荷载、采场围岩及过渡区自重等影响因素, 对过渡区进行条块划分, 利用微分条块的方法计算过渡区的剪应力和重力. 由于不同条块的物理参数不同, 应用极限平衡法计算过渡区厚度, 条块划分的数量越多, 计算结果越准确. 过渡区受力情况如图 1 所示.

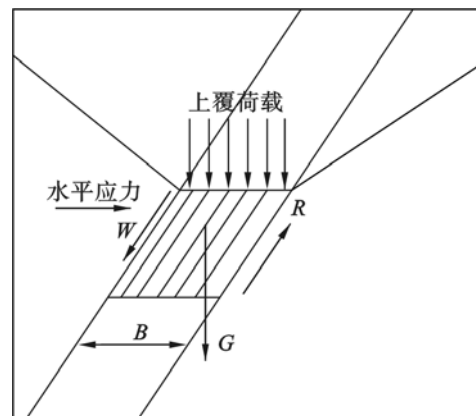


图 1 过渡区受力示意图
Fig. 1 Schematic diagram of force at transition zone

采场开挖后, 定义安全系数 η 为过渡区 m 条岩层(对于 i 条厚度 h_{ij})重力与侧边剪力的比值, 即

$$\eta = \frac{\text{抗滑力}(R)}{\text{滑动力}(W)} = \frac{\text{水平应力} + \text{矿柱自重}}{\text{上覆岩体自重}} =$$

$$\frac{2 \sum_{i=1}^n (\sigma_{xi} h_{zi} \tan \varphi_i \sin \theta + h_{zi} \frac{c_{zi}}{\sin \theta})}{B \sum_{j=1}^m h_{sj} \gamma_s \sin \theta} \quad (8)$$

式中：

$$\sigma_{xi} = \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} (\sigma_{z(i-1)} + \frac{\gamma_i h_i}{2}) = \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} \times (\sum_{j=1}^{i-1} \gamma_j h_j + \frac{\gamma_i h_i}{2});$$

式中： $i=1,2$ ，分别为回填料和围岩的岩土层； c_i ， φ_i ， γ_i ， μ_i 分别为岩层的黏聚力、内摩擦角、容重和泊松比； σ_{xi} 为水平应力； θ 为矿体倾角。

考虑到矿山生产习惯及一定的安全储备，参考其安全系数^[14]，并采用极限平衡法推算过渡区厚度，决定选取 3 组数据（见表 1）。此部分留存的矿体，待深部开采稳产后，再考虑将其回采。

表 1 过渡区厚度数据

Table 1 Thickness of transition zone

过渡区厚度/m	8.5	10	12
安全系数	1.1	1.3	1.5

3 合理过渡区厚度稳定性分析

3.1 模型的构建

根据以上方案及相关地质资料，采用数值分

析软件 midas GTS^[15] 建立如图 2 所示模型，然后通过软件接口导入大型数值分析软件 FLAC 3D^[16-17] 进行加载分析。根据矿山的地质报告，选取的模型参数见表 2。模型上表面为 -120 m 水平，模型尺寸为 196 m×180 m×180 m。本着从极限角度出发的思想，模型在矿房全部开挖完毕后进行加载。加载过程中记录矿房顶板和矿柱顶板的位移。

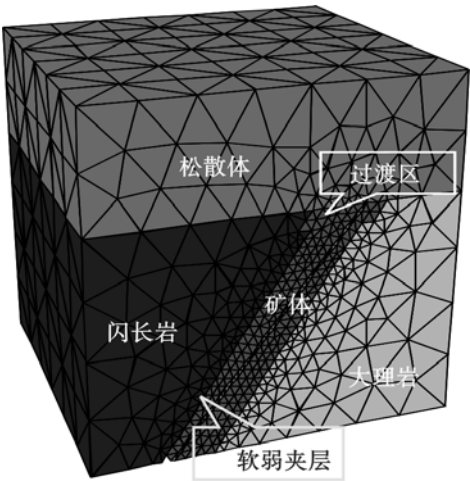


图 2 模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of model

3.2 模型的数值分析

从数值分析结果可以看出：过渡区应力集中明显，且靠近下盘位置，此处亦有软弱夹层的存

表 2 数值模拟岩石力学参数

Table 2 Rock mechanic parameters for numerical simulation

岩体	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\varphi/(^{\circ})$	E/MPa	μ	c/MPa	σ_t/MPa
松散岩体	17.00	27.00	1.00E+01	0.11	0.00	0.00
矿体	40.00	42.00	1.20E+04	0.27	18.00	2.50
充填体	18.20	38.00	4.50E+02	0.15	0.75	0.73
软弱夹层	19.70	31.00	3.40E+02	0.39	0.58	0.03
闪长岩	27.50	35.00	2.50E+04	0.28	30.00	3.20
大理岩	27.50	30.00	3.00E+04	0.20	25.00	3.30

在，软弱夹层同样导致了应力集中的出现。通过 3 组数值模拟情况的对比，应力集中主要体现为剪应力的集中，矿房开挖及矿柱开挖后 3 组不同厚度过渡区的剪应力分布情况如图 3 所示。统计不同厚度过渡区在矿房、矿柱开挖后的最大剪应力，由图 4 可以看出，剪应力集中现象随着过渡区厚度的增加而减轻。

由于过渡区内剪应力集中，其值大于岩体强度，必定引起破坏，在矿房开挖后，由图 3 塑性区圈中所示，当过渡区厚度为 8.5 及 10 m 时，过渡区的塑性破坏均已经贯通，不能保证过渡区的安

全性。当过渡区厚度为 12 m 时，塑性破坏没有贯通，过渡区是稳定的。主要是由于软弱夹层的存在，导致了应力集中过大，过渡区越厚则受应力集中的影响就越小，因此在 3 种方案中，只有厚度最大的才能保证稳定。

在模型的加载过程中，分别对矿房及矿柱的顶板位移从开挖开始进行了跟踪记录，位移曲线如图 5 所示。在矿房开挖后，矿房顶板出现下沉现象，围岩应力趋于平衡后顶板位移曲线变得平缓，矿房充填后顶板位移没有发生太大的变化。当矿柱开挖后，充填体在压力作用下会产生应变，矿柱

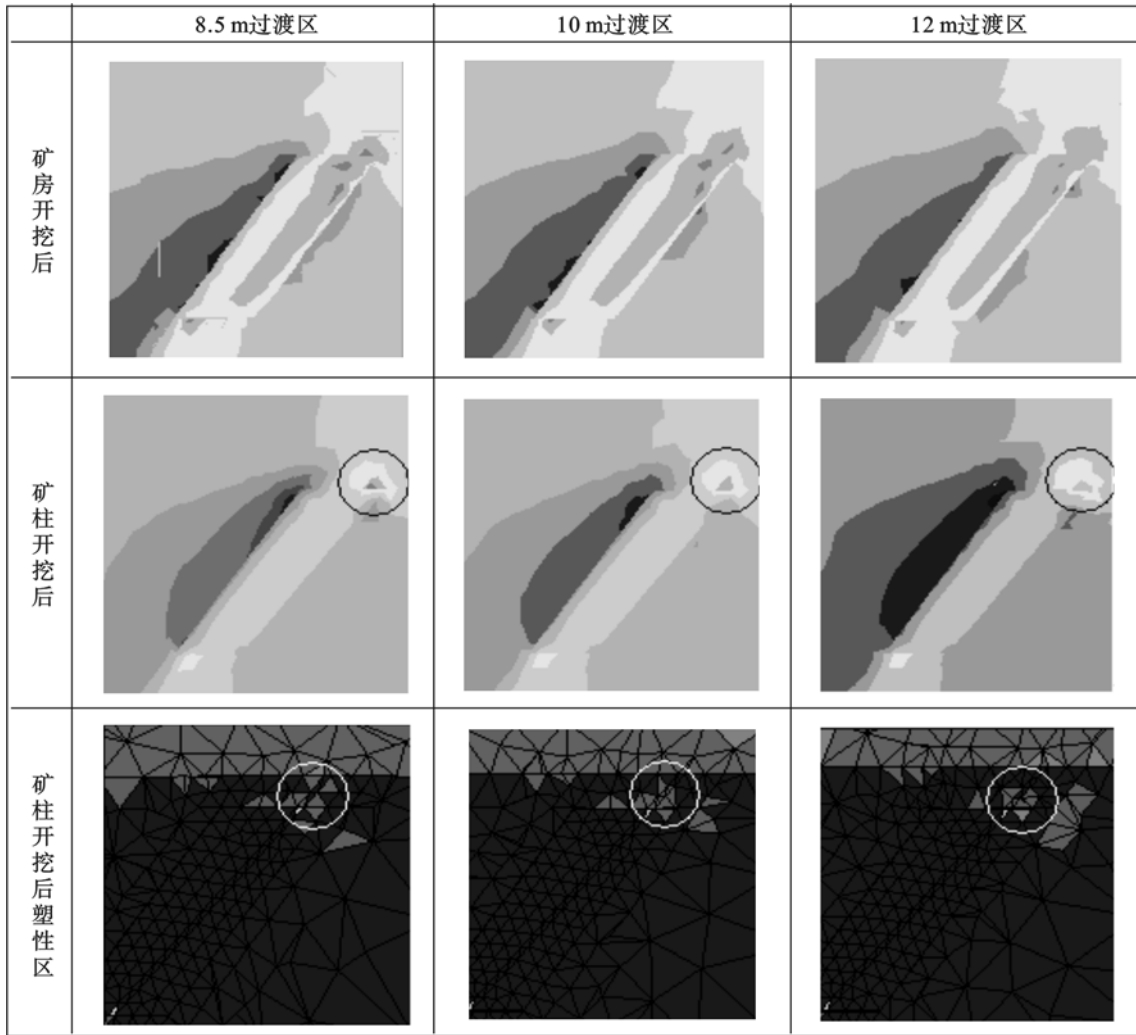


图3 剪应力及塑性区对比图

Fig. 3 Comparison of shear stress nephogram and plastic zone

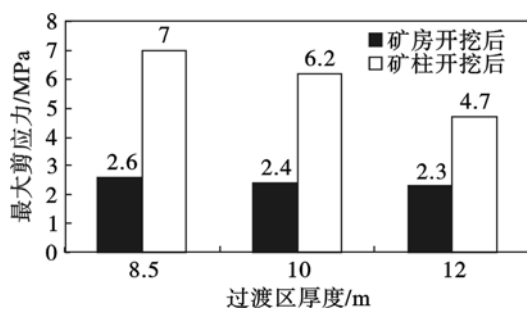


图4 最大剪应力柱状图

Fig. 4 Histogram of maximum shear stress

的开挖给充填体的应变提供空间,使得顶板位移急剧增加,在围岩稳定后,顶板位移曲线又趋于平缓. 同时在矿柱开挖后,伴随着顶板位移的变化,矿柱顶板也出现了显著的位移. 由于厚度的不同,位移大小也不尽相同,位移量随着过渡区厚度的变大而减小,过渡区的安全性也相应提高.

由以上分析可知,过渡区应力集中主要存在于软弱夹层的位置,这是因为在回采过程中由于

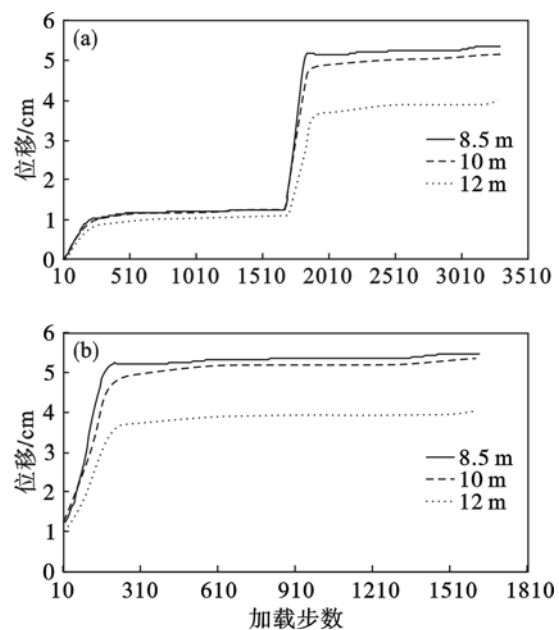


图5 不同厚度过渡区顶板位移

Fig. 5 Roof displacement of transition zones with different thickness

(a)—矿房顶板位移; (b)—矿柱顶板位移.

岩体的上覆荷载及围压的自重和位移所引起的局部应力集中现象. 由于应力集中现象, 应力值大于岩体强度, 使得过渡区发生了塑性破坏. 仅 12 m 厚过渡区的塑性破坏没有贯通. 从顶板位移也能看出, 8.5 以及 10 m 厚的过渡区位移量相差不大, 与 12 m 厚过渡区有明显差别. 由此可见, 留设 12 m 过渡区在下部回采过程中, 足够维持矿区的稳定, 并能适应矿山矿石回采过程中设置 12 m 一个分段的生产习惯. 因此, 建议矿山留设 12 m 厚过渡区.

4 结 论

1) 地下矿山的采矿工作在由浅部向深部的发展过程中, 伴随采矿方法的转变, 留设过渡区能有效减轻浅部地压对深部采矿工作的影响, 减少冲击地压、冒顶片帮等灾害事故的发生及发展.

2) 在过渡区下部进行开采的过程中, 软弱夹层位置会出现应力集中及少量的塑性破坏, 影响过渡区的稳定. 留设 12 m 的过渡区, 使得过渡区的塑性破坏没有贯通, 能够保证采场的稳定, 以及使后期对其进行的回采工作适应矿山的生产习惯, 满足过渡期间安全生产的要求, 为矿山的安全平稳过渡生产提供依据.

参考文献:

- [1] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 25(1): 18-22.
(Gu De-sheng. The development tendency of mining science of underground metal mine[J]. *Gold*, 2004, 25(1): 18-22.)
- [2] 刘同友. 国际采矿技术发展的趋势[J]. 中国矿山工程, 2005, 34(1): 35-40.
(Liu Tong-you. Developing tendency of international mining technique[J]. *China Mine Engineering*, 2005, 34(1): 35-40.)
- [3] 李元辉, 南世卿, 赵兴东, 等. 露天转地下境界矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278-283.
(Li Yuan-hui, Nan Shi-qing, Zhao Xing-dong, et al. Stability of boundary pillar for transition from open pit to underground mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(2): 278-283.)
- [4] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(sup1): 2616-2622.
(Zhao Xing-dong. Stability analysis of insulating pillar of excavation of Chambishi Copper Mine in depth[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(sup1): 2616-2622.)
- [5] 赵雄飞, 吕光宗, 杨小勇. 含水老窿区下部开采隔水方法探讨[J]. 中国矿业, 2007, 16(8): 45-47, 51.
(Zhao Xiong-fei, Lyu Guang-zong, Yang Xiao-yong. Contains water lower part the old hole area to mine separates the mater method discussion [J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(8): 45-47, 51.)
- [6] 李海洲, 杨天鸿, 张洪海, 等. 龙桥铁矿复杂采空区的探测及处理方案[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(11): 1647-1650.
(Li Hai-zhou, Yang Tian-hong, Zhang Hong-hai, et al. Detection and disposal of the complex goaf in Longqiao Iron Mine [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(11): 1647-1650.)
- [7] 刘洪磊, 杨天鸿, 黄德玉, 等. 桓仁铅锌矿复杂采空区处理方案[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(6): 871-874.
(Liu Hong-lei, Yang Tian-hong, Huang De-yu, et al. Schemes for disposing complex goaf in Huanren Lead-Zinc Mine [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32(6): 871-874.)
- [8] 乔国刚, 甘德清. 石人沟铁矿露天转地下覆盖层合理厚度[J]. 河北理工学院学报, 2005, 5(2): 8-13.
(Qiao Guo-gang, Gan De-qing. The study on thickness of covering layer when turning open pit into underground mining at Shirengou [J]. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2005, 5(2): 8-13.)
- [9] 张友锋, 张耀平, 王林. 安庆铜矿深部开采-400 m 隔离矿柱稳定性分析[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(6): 62-67.
(Zhang You-feng, Zhang Yao-ping, Wang Lin. Stability analysis of -400 m level insulating pillar of deep excavation in Anqing Copper Mine [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2011, 2(6): 62-67.)
- [10] 王文杰, 任凤玉, 周宗红, 等. 夏甸金矿采矿方法过渡期临时矿柱尺寸确定方法研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(4): 61-63.
(Wang Wen-jie, Ren Feng-yu, Zhou Zong-hong, et al. The interim pillar size design method study of mining method transition in Xiadian Gold Mine [J]. *China Mining Magazine*, 2007, 16(4): 61-63.)
- [11] 采矿设计手册编写委员会. 采矿设计手册: 矿床开采卷[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
(Compilation Group of Mining Design Manual. Mining design manual: deposit exploitation volume [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1987.)
- [12] 王青, 史维祥. 采矿学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
(Wang Qing, Shi Wei-xiang. Mining science [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.)
- [13] Tinti S, Manucci A. Gravitational stability computed through the limit equilibrium method revisited [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(1): 1-44.
- [14] Mohamed T, Kasa A, Taha M R. Prediction of safety factor for slope designed with various limit equilibrium methods [J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 462/463: 611-615.
- [15] Chen Q F, Liu Y X. Study on the size effect of goaf stability [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 1597-1601.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. FLAC 3D theoretical background [R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc, 2003.
- [17] Bian H B, Jia Y, Armand G, et al. 3D numerical modeling thermo-hydro mechanical behavior of underground storages in clay rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(7): 1095-1112.