

## 采空区对边坡稳定性的影响

柴红保<sup>1,2</sup>, 曹平<sup>1</sup>, 柴国武<sup>3</sup>, 林杭<sup>1</sup>

1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭, 411201;
3. 河南省水文水资源局 西峡水文站, 河南 南阳, 474500)

**摘要:**采空区对地下开采与露天开采转换过程中的边坡稳定性存在一定的影响。为了研究空区对边坡稳定性的影响规律,利用强度折减法分析多种情况下边坡的稳定性。研究表明:空区在坡脚附近,边坡的安全系数降低达20%左右;边坡中部的空区对边坡的稳定性影响取决于空区几何中心相对于滑动面水平位置,空区几何中心在滑动带内将引起边坡稳定性增加,空区几何中心在滑动带外将引起边坡稳定性减小;空区在边坡脚下部时,在距边坡脚水平距离一定范围内,空区会引起滑坡体体积增大,边坡安全系数降低;在距边坡脚水平距离某一范围内的空区,由于自身顶板松动区的出现导致边坡体的下滑力降低,使边坡的安全系数增加;同一高度的空区,距坡面水平距离的不同会引起边坡滑动面位置发生改变;空区几何中心距离滑动面超过一定距离后,边坡的稳定性不再受空区的影响。该规律对地下开采与露天开采转换过程中的边坡工程施工具有一定的实践指导意义。

**关键词:**采空区;边坡;安全系数

中图分类号: TU457; TD853

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1528-07

## Influence of goaf on slope stability

CHAI Hong-bao<sup>1,2</sup>, CAO Ping<sup>1</sup>, CHAI Guo-wu<sup>3</sup>, LIN Hang<sup>1</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
3. Xixia Hydrometric Station, Hydrology and Water Resources Bureau of Henan Province, Nanyang 474500, China)

**Abstract:** The goaf has greatly influence on the slope stability. The goaf with different span and position has different influences on the slope stability. The stability of slope with different goafs was analysed. The results show that the safety factor reduces by 20% when the goaf lies in the bottom of the slope. When the goaf lies in the middle of the slope, the influence on the slope stability depends on the relative horizontal position of the goaf geometric center and the slipping face. When the geometric center of the goaf lies in the interior of the slids, the slope stability is enhanced. When the goaf center lies in the outside of the slids, the slope stability decreases. The safety factor of the slope is greatly influenced when the goaf lies in the bottom of the slope. The goaf may make the slip zone thicker when the goaf lies near the sliding surface. At the same time the stability of slope reduces to some extent. The slope stability increases when the broken zone of the goaf roof causes the sliding force to decrease. The effect of goaf is weakened when the distance between the the geometric center of the goaf and slids face exceeds a limit. This law has guidance to the slope excavation engineering practice in open-pit mining transferring.

**Key words:** goaf; slope; safety factor

收稿日期: 2009-08-13; 修回日期: 2009-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774093); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060533071)

通信作者: 柴红保(1977-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 从事岩土工程研究; 电话: 13574091922; E-mail: chbmoon@163.com

在地下开采和露天开采的转换过程中,在地下形成的空区对露天矿边坡的稳定性会造成严重的影响,如甘肃白银有色金属公司的厂坝铅锌矿、贵州瓮福磷矿和中铝河南公司夹沟铝矿等。为此,很多学者进行了研究,如:尹贤刚等<sup>[1]</sup>对厂坝铅锌矿岩石物理力学性能进行测试,为厂坝铅锌矿在多空区影响下露天转地下的过渡层开采提供了基础数据;刘辉等<sup>[2]</sup>对大冶铁矿露天转地下开采过程中矿山中因采矿引起的围岩松动和冒落等力学行为进行了离散元数值模拟研究和分析;宋伟东等<sup>[3]</sup>针对大冶铁矿东露天边坡的工程地质条件,结合实际的开挖顺序,采用极限平衡法和有限差分法模拟这2种方法对最终边坡的整体稳定性进行计算分析,确定了转入地下开采所需的安全覆盖层厚度;刘献华<sup>[4]</sup>研究了紫金山金矿开采方式由地下开采向露天开采转型后,特定生产条件下存在的关键安全问题和事故隐患,提出了切实可行的生产安全技术措施;李元辉等<sup>[5]</sup>针对石人沟铁矿露天转地下开采的实际情况,采用极限平衡分析和数值模拟方法,对具有代表性的境界矿柱进行了分析计算,为境界矿柱稳定性分析的方法进行了验证和补充,同时也为露天转地下境界矿柱厚度设计施工提供依据和指导;闫长斌等<sup>[6-9]</sup>在采空区形状的探测方面进行了大量的研究;罗周全等<sup>[10-16]</sup>研究了空区的稳定性。鉴于空区位置和跨度的不同对边坡的稳定性产生的影响不同。本文作者建立了多个分别包含位置不同、跨度不同的空区的边坡模型,使用强度折减法对这些边坡的稳定性进行分析,研究位置不同、跨度不同的空区对边坡的稳定性影响规律。

## 1 强度折减法原理

Zienkiewicz 等<sup>[16]</sup>提出抗剪强度折减系数的概念,基于该方法所确定的强度储备安全系数与 Bishop<sup>[17]</sup>在极限平衡法中所给的稳定安全系数在概念上是一致的。抗剪强度折减系数就是在外荷载保持不变的情况下,通过降低边坡岩土的强度参数,使边坡达到极限平衡状态,边坡体所发挥的最大抗剪强度与经折减后使边坡处于极限平衡状态的强度参数的比。其基本原理是将岩土体强度指标  $c$  和  $\phi$  同时除以折减系数  $f$ ,得到一组新的  $c'$  和  $\phi'$ ,然后作为新的材料参数进行试算。当边坡符合给定的临界破坏状态判定条件时,对应的  $f$  即为边坡的最小安全系数<sup>[8]</sup>。其中: $c'$ 和 $\phi'$ 分

别由式(1)和(2)求得,而弹性模量  $E$  泊松比  $\mu$  在计算中假设为定值,不随  $c$  和  $\phi$  的改变而变化。

$$c' = c / f \quad (1)$$

$$\phi' = \arctan(\tan \phi / f) \quad (2)$$

## 2 空区位置和跨度对边坡稳定性的影响

### 2.1 计算模型及边界条件

为了研究空区跨度和位置对边坡稳定性的影响,针对空区在边坡的中部、底部和边坡脚下部等不同位置,分别建立了跨度为 4, 6, 8, 10 和 12 m 共 5 种情况下的边坡模型,此外,建立了空区尺寸固定但水平位置不同所对应的模型,所有空区高度均为 5 m。所有模型中边坡的高度均为 60 m,边坡角为 50°。

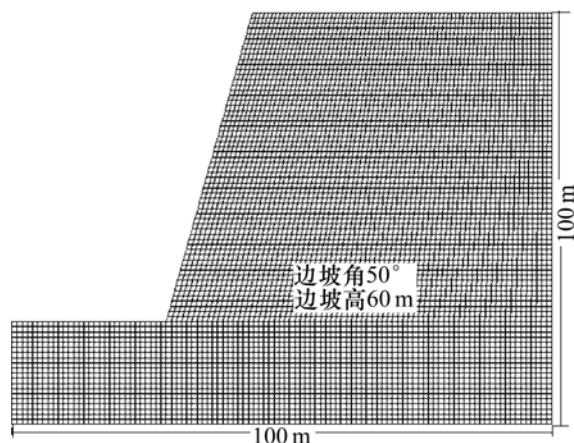


图1 边坡计算模型

Fig.1 Calculate model of slope

计算模型边界条件:边坡底部所有自由度均被约束,边坡左右两侧边界约束水平方向和垂直边坡断面方向的自由度。

坡体材料采用摩尔库仑模型,密度为  $27 \times 10^3$  N/m<sup>3</sup>,弹性模量为  $1.0 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.23,黏聚力为  $0.42 \times 10^5$  Pa,内摩擦角为 17°,抗拉强度为 0.05 MPa。模型共划分为 6 750 个单元,生成 14 012 个节点。

### 2.2 无空区边坡稳定性

使用 FLAC3D 软件建立了无空区边坡模型,边坡角为 65°,边坡高度为 60 m。经计算,边坡的安全系数为 2.55,边坡内最大的位移为 0.08 m,边坡剪应变率云图见图 2。

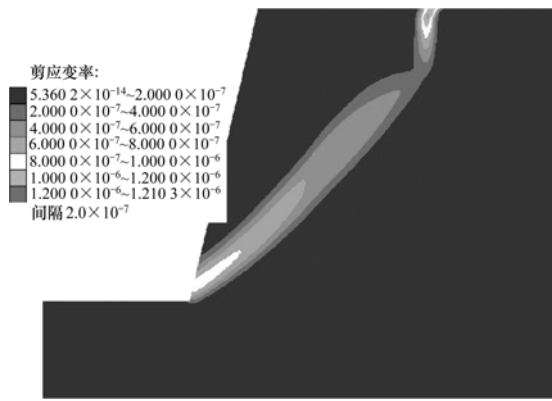


图 2 无空区边坡剪应变率云图

Fig.2 Shear strain rate contour of slope without goaf

2.3 不同空区跨度和位置情况下边坡的稳定性

经计算，不同空区跨度和位置情况下边坡的安全系数及其相对无空区边坡的安全系数降低率见表 1~3。

表 1 底部跨度和边坡安全系数及其降低率

Table 1 Span and safety factor of slope and its changing at bottom

空区跨度/m	安全系数	安全系数降低率/%
4	2.36	7.52
6	2.24	12.4
8	2.14	16.2
10	2.04	20.2
12	1.94	24.0

由表 1 可知：相对于无空区情况，空区位于边坡底部时，边坡的稳定性均有一定程度的降低，并且边坡安全系数的降低程度与空区的跨度呈线性负相关关系，即边坡底部空区的跨度越大，边坡的安全系数越小，边坡的稳定性越差。由于边坡底部空区降低了滑

表 2 中部跨度和边坡安全系数及其降低率

Table 2 Span and safety factor of slope and its changing at middle

空区跨度/m	安全系数	安全系数降低率/%
4	2.56	-0.21
6	2.49	2.49
8	2.84	-11.20
10	2.17	14.80
12	2.17	14.80

动面的抗滑能力，空区的跨度越大，滑动面抗滑能力降低得越多，边坡的安全系数就越小，越容易失稳。

由表 2 知：相对于无空区的情况，位于边坡中部，跨度为 4 m 和 8 m 的空区引起边坡安全系数增加，跨度为 6，10 和 12 m 的空区均引起边坡稳定性降低。位于边坡中部的空区既可能引起边坡安全系数提高，也可能引起边坡安全系数降低。当空区位于边坡的中部时，空区对边坡稳定性的影响与空区相对滑动面的位置有关。空区中心在滑动面外部相当于降低了滑动面的抗滑能力，因而边坡稳定性降低；相反，则起到了减载即减小滑坡体质量的作用，故边坡稳定性增大。

表 3 顶部跨度和边坡安全系数及其降低率

Table 3 Span and safety factor of slope and its changing at top

空区跨度/m	安全系数	安全系数降低率/%
4	2.63	-2.0
6	2.60	-7.8
8	2.60	-12.5
10	2.56	-17.6
12	2.56	-23.0

由表 3 可知：空区位于边坡顶部时，边坡的安全系数均不同程度地增大，边坡稳定性增加，且空区跨度愈大，边坡稳定性愈高。

2.4 空区在不同水平位置情况下边坡的稳定性

空区在边坡同一水平高度，但空区距边坡面的距离不同，它对边坡稳定性的影响也是不同的。空区距坡面不同距离对应的边坡安全系数见表 4。

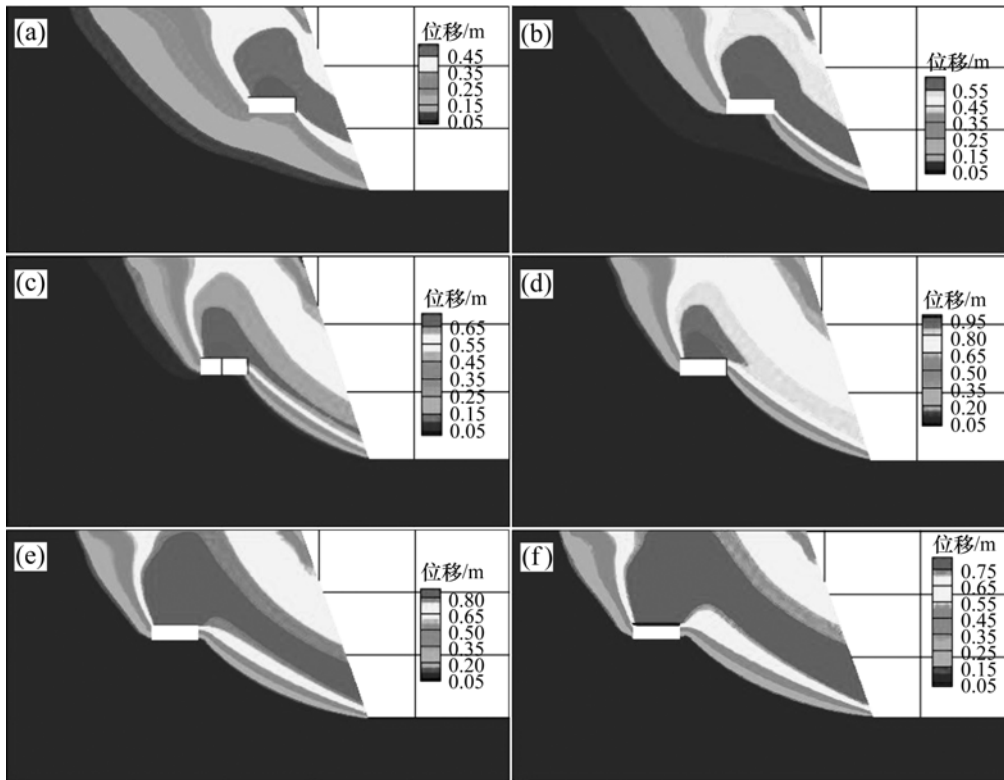
由表 4 可知：位于边坡中部的空区，随空区距边坡面的距离逐渐增大，边坡的安全系数先后经历增大变小 增大的过程。空区处于边坡同一水平位置，但是距坡面的距离不同，它对边坡的稳定性影响也不同。

空区在边坡中部时，边坡内的位移云图见图 3。

表 4 空区距坡面不同距离对应的安全系数

Table 4 Different safety factor to different distance of goaf to slope face

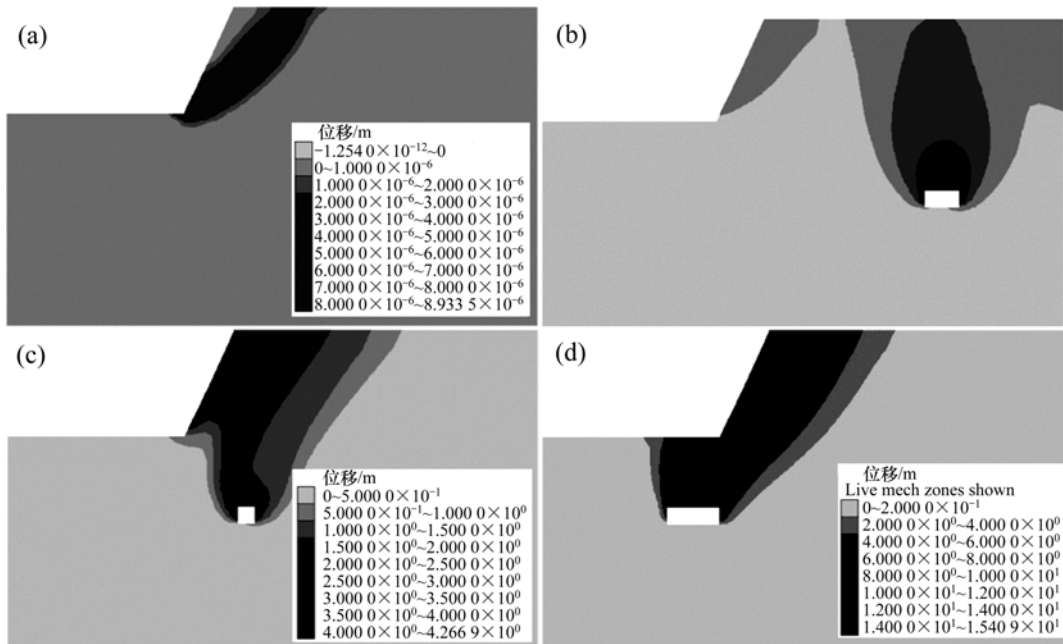
坡面距离/m	安全系数	
	中部	顶部
15	2.18	2.71
20	2.18	2.56
25	2.57	2.48
30	2.35	2.49
35	2.48	2.48



空区距坡面的距离/m : (a) 15 ; (b) 20 ; (c) 25 ; (d) 30 ; (e) 35 ; (f) 40

图 3 中部含空区边坡内的位移云图

Fig.3 Displacement contours of slope with goaf with different distances to slope surface at middle



(a) 无空区边坡 ; (b) 空区跨度 10 m ; (c) 空区跨度 5 m ; (d) 空区跨度 15 m

图 4 空区位于边坡脚下部坡体位移云图

Fig.4 Displacement contours of slope with goaf below slope foot

由图 3 可知：空区位于边坡中部，当空区距离坡面 15 m 时，边坡内最大位移为 0.45 m，安全系数为 2.18；当空区距离坡面 20 m 时，边坡内最大位移为 0.55 m，安全系数为 2.18；当空区距离坡面 25 m 时，边坡内最大位移为 0.65 m，安全系数为 2.57；当空区距离坡面 30 m 时，边坡内最大位移为 0.95 m，安全系数为 2.35；当空区距离坡面 35 m 时，边坡内最大位移为 0.80 m，安全系数为 2.48；当空区距离坡面 40 m 时，边坡内最大位移为 0.75 m，安全系数为 2.48。

### 2.5 边坡脚下部空区对边坡稳定性的影响

为了研究边坡脚下部的空区对边坡稳定性的影响，分析了没有空区、跨度分别为 5 m 和 15 m 的空区及空区不同水平位置等多种情况，在这些情况下空区距边坡脚的垂直距离均为 20 m，空区位于边坡脚下部边坡体位移云图如图 4 所示。图 4(a)所示为没有空区边坡的位移云图，该边坡已经失稳滑动。图 4(b)所示为含跨度为 10 m 的空区，水平距离 30 m，与无空区边坡相比，滑动带增大了很多，空区的存在大大降低了边坡的稳定性。图 4(c)所示为跨度为 5 m 的空区，该空区的存在引起边坡的安全系数有较大幅度的降低，其滑坡体的范围与无空区边坡的滑坡范围相比出现较大幅度的增大。图 4(d)所示为跨度为 15 m 的空区，空区距离边坡脚的水平距离为 10 m，该边坡是稳定的，但是空区的顶板出现了破坏。

## 3 空区对边坡稳定性影响的综合分析

空区对边坡稳定性的影响程度与空区和边坡滑动面的相对位置有关。利用理正软件边坡稳定性分析模块建立了边坡模型(图 5)，边坡角为  $50^\circ$ ，边坡高度为 60 m。经计算，边坡滑动面半径为 115 m，图 5 中的粗实线为滑动面，边坡的安全系数为 2.7，边坡顶部距滑动面的距离为 30 m。

分析了空区在边坡底部、中部和顶部等位置，空区跨度为 4, 6, 8, 10 和 12 m 5 种情况，空区距坡面距离为 15, 20, 25, 30, 35 和 40 m 共 5 种情况(见图 6)。

空区位于边坡底部时，当空区与坡面的距离在某个范围时，不同尺寸和水平位置空区均将引起边坡安全系数降低；当边坡底部的空区距离坡面超过一定距离后，对边坡的稳定性就没有影响。

如图 6 所示，当空区位于边坡中部，空区的中心没超过滑动面时，空区的存在相当于减小了滑动体的

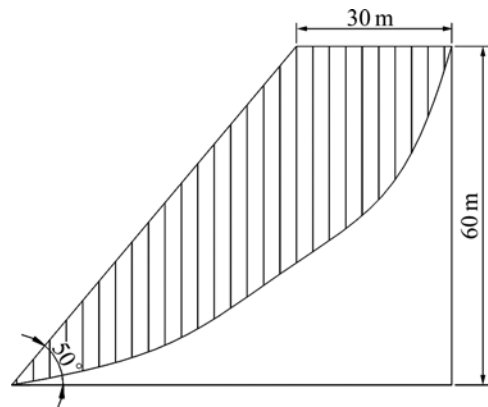


图 5 边坡模型

Fig.5 Landslide model

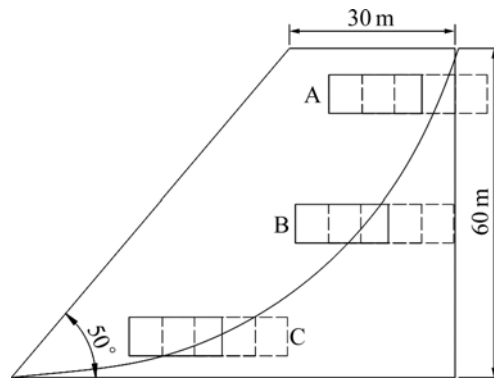


图 6 含不同跨度空区边坡模型

Fig.6 Model contained goaf with different span

质量，相应滑动面的下滑力就会减小，边坡的安全系数就会增大；空区的跨度越大，边坡体质量就会越小，边坡的稳定性就会增加；当空区的中心超过滑动面时，空区的存在相当于降低了滑动带的强度，相应滑动面的抗滑力就会减小，边坡的安全系数就会减小，空区的跨度越大，滑动面的抗滑力就会减小，边坡的稳定性就会下降。

当空区处于边坡中部时，塑性区会随着空区水平位置的改变而改变，并且塑性区范围随空区距坡面距离增加而增加；当边坡处于极限平衡状态时，边坡内塑性区也会不断扩大，从而导致滑动带变宽；处于边坡顶部时，塑性区随空区距坡面水平距离增加而增加；当边坡处于极限平衡状态时，边坡内塑性区也会不断扩大；不管空区在边坡中部还是顶部，均会在空区附近引起较大的位移；当空区距坡面越远时，边坡内的塑性区范围就会越大，对边坡的稳定性影响就会越严重。

当空区位于边坡脚下部时，空区对边坡稳定性的

影响取决于其与边坡脚的相对位置。当空区距离边坡脚比较近时,边坡的稳定性会有大幅度地降低,同时,滑坡体的体积也会增大,此种空区将引起边坡安全系数增大。如图4所示,当空区距离边坡脚的水平距离达到一定程度后,边坡的稳定性有一定程度的增加,但空区顶板发生了一定范围的破坏,导致边坡体的下滑力降低,因而边坡的安全系数提高。

## 4 结论

(1) 空区位于边坡底部时,空区对边坡的稳定性有较大的影响,特别是位于边坡脚的空区,边坡的安全系数降低。且空区跨度越大,边坡的滑坡体体积越大,边坡安全系数越小。

(2) 空区位于边坡中部时,空区对边坡的稳定性影响稍复杂:当空区中心在滑动带内部时,空区跨度越大,边坡的稳定性越好;当空区中心在滑动带外部,但空区仍处在滑动面上时,空区跨度越大,边坡的稳定性越弱;当空区完全处于滑动面外时,空区对边坡的稳定性几乎没有影响。

(3) 当空区位于边坡中部和底部附近时,塑性区的范围会随着空区距边坡面距离的增加而扩大,空区距边坡面的距离越大,滑坡体体积越大;边坡潜在滑移面位置会随着空区位置的移动而移动。这主要是由于在空区周围形成了应力集中,导致在空区周围更容易发生破坏失稳。

(4) 当空区位于边坡脚下部时,在距边坡脚水平距离一定范围内,空区的存在都会引起滑坡体体积增大,边坡安全系数降低。这主要是由于空区的顶板发生破坏,并且在顶板一定范围内延伸,导致边坡稳定性降低。在距边坡脚水平距离某一范围内的空区,由于自身顶板松动区的出现导致边坡体的下滑力降低,因而边坡的安全系数增加。

### 参考文献:

- [1] 尹贤刚,李庶林,唐海燕. 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 Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan. The tests and studies of the physical mechanical properties of the rocks from Changba Lead-Zinc Mine[J]. Mining R & D, 2003, 23(5): 12-14.
- [2] 刘辉,陈文胜,冯夏庭. 大冶铁矿露天转地下开采的离散元数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1413-1417.  
LIU Hui, CHEN Wen-sheng, FENG Xia-ting. Numerical modeling of daye iron open-pit-mine transferring to underground mining by discrete element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1413-1417.
- [3] 宋伟东,杜建华,谢正平. 大冶铁矿深凹露天开采最终边坡稳定分析[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(4): 385-389.  
SONG Wei-dong, DU Jian-hua, XIE Zheng-ping. Stability of the finished slope of Daye iron open-pit-mine[J]. Journal of University and Technology Beijing, 2005, 27(4): 385-389.
- [4] 刘献华. 地下转露天开采的主要安全隐患与技术对策[J]. 金属矿山, 2002(7): 52-54.  
LIU Xian-hua. Major security risks and technical countermeasures during pit-open-mining[J]. Metal Mine, 2002(7): 52-54.
- [5] 李元辉,南世卿,赵兴东. 露天转地下境界矿柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278-283.  
LI Yuan-hui, NAN Shi-qing, ZHAO Xing-dong. Stability of boundary pillars for transition from openpit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 278-283.
- [6] 闫长斌,徐国元. 综合物探方法及其在复杂群采空区探测中的应用[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 10-14.  
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan. Integrated geophysical and its application in the complex goaf detection[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 20(3): 10-14.
- [7] 刘菁华,王祝文,朱士,等. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 715-719.  
LIU Jing-hua, WANG Zhu-wen, ZHU Shi, et al. The geophysical exploration about exhausted are and sinking area in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 715-719.
- [8] 罗周全,鹿浩,袁节平,等. 金属矿采空区精密探测与三维建模技术[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 83-86.  
LUO Zhou-quan, LU Hao, YUAN Jie-ping, et al. Sophisticated detection and the creation technology of the three dimensional model about metal mine[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 23(3): 83-86.
- [9] 胡海峰,赵阳升,康建荣,等. 煤矿采空区跨度和延续时间与地面残余变形的相关规律及实证[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 65-71.  
HU Hai-feng, ZHAO Yang-sheng, KANG Jian-rong, et al. Related laws and verification of mined-out area span time and residual deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2008, 27(1): 65-71.
- [10] 罗周全, 刘晓明, 吴亚斌, 等. 基于 Surpac 和 Phase<sup>2</sup>耦合的采空区稳定性模拟分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2008, 27(4): 485-488.
- LUO Zhou-quan, LIU Xiao-ming, WU Ya-bin, et al. Study on cavity stability numerical simulation based on coupling of Surpac and Phase<sup>2</sup>[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2008, 27(4): 485-488.
- [11] 王金安, 尚新春, 刘红, 等. 采空区坚硬顶板破断机理与灾变塌陷研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 850-855.
- WANG Jin-an, SHANG Xin-chun, LIU Hong, et al. Study on fracture mechanism and catastrophic collapse of strong roof strata above the mined area[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(8): 850-855.
- [12] 闫长斌, 徐国元, 李夕兵. 爆破震动对采空区稳定性影响的 FLAC<sup>3D</sup> 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2894-2899.
- YAN Chang-bin, XU Guo-yuan, LI Xi-bing. Stability analysis of mined-out areas influenced by blasting vibration with FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2894-2899.
- [13] 朱湘平. 131 矿体采空区顶板稳定性研究[J]. 金属矿山, 2003(9): 13-15.
- ZHU Xiang-ping. Study on roof stability of mined area in No.131 orebo[J]. Metal Mine, 2003(9): 13-15.
- [14] 蒋卫东, 李夕兵, 胡柳青, 等. 基于灰色定权聚类的采空区上部地表稳定性分析[J]. 矿冶工程, 2002, 22(4): 15-17.
- JIANG Wei-dong, LI Xi-bing, HU Liu-qing, et al. Stability analysis of ground above excavated area based on grey fixed weight cluster[J]. Mine and Metallurgical Engineering, 2002, 22(4): 15-17.
- [15] 李俊平, 周创兵, 李向阳. 下凹地形下采空区处理方案的相似模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 581-586.
- LI Jun-ping, ZHOU Chuang-bing, LI Xiang-yang. Similarity simulation of disposal scheme for abandoned stope under the sunken topography[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 581-586.
- [16] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and nonassociated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [17] Bishop A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1955(1): 71.

(编辑 陈爱华)