

数值分析法确定露转坑岩层移动范围

付玉华^{1,2}, 董陇军¹

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 江西理工大学应用科学学院, 江西赣州 341000

摘要 随着浅部矿产资源的枯竭, 中国许多露天开采已经或即将转入地下开采, 或露天与地下联合开采。合理确定岩层及地表的移动, 为露转坑设计和安全生产提供依据是露转坑联合开采首先要解决的重要课题之一。为了验证永平铜矿露天转地下开采工程设计的合理性, 为后续安全生产提供参考, 采用三维有限差分数值模拟计算方法, 系统地分析永平铜矿 II、IV 号矿体在不同开采水平的岩体移动变形、地表位移变化及露采边坡稳定状态, 给出了相应开采水平的岩体及地表移动变形特征、最大垂直和水平位移, 以及岩体移动角。结果表明, II 号矿体对岩层移动的影响远大于 IV 号矿体; 最大垂直和水平位移均在 II 号矿体上部东部边坡岩体中; 合理的开采顺序应是先采 IV 号矿体, 后采 II 号矿体; 模型局部地段处于破坏或极限稳定状态, 但随开采深入, 露采边坡整体处于稳定状态, 因此矿山采用的矿房回采嗣后充填采矿方法合理可行。用 FLAC3D 数值模拟方法研究露转坑联合开采的岩层移动规律, 反映了岩体应力、变形的客观过程, 为露转坑矿体开采岩层移动范围确定提供了一条新的途径。

关键词 采矿工程; 岩移参数; 数值分析; 岩层移动

中图分类号 TD32

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)04-0074-06

Range of Rock Movement in Transition from Open Pit to Underground Mining Determined by Numerical Method

FU Yuhua^{1,2}, DONG Longjun¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. School of Application and Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi Province, China

Abstract With the depletion of shallow mineral resources, many open pits have been already or shall soon be switched to underground mining. The safety design of open pit stoppage combined with the opening of underground mine involves many problems. In this paper, FLAC3D is used to systematically analyze the rock layer movement and deformation. Surface displacements of ore-bodies II and IV at different mining levels are discussed. With the determination of parameters of rock layer movements, the open pit slope stability of Yongping copper mine is analyzed. The corresponding movement characteristics of rock mass, maximal vertical and horizontal displacements as well as rock movement angles are obtained. Results show that the influence of ore-body II on the rock layer movement is far greater than that of ore-body IV. The maximum vertical and horizontal displacements all occur in the rock mass located on the eastern slope of ore-body II. The reasonable mining sequence should be ore-body IV first and ore-body II second. A part of the model area is in the state of breakage and limit stability. However, the open pit slope is in an integral stability state as the mining advances. It is shown that the filling method used in the next stage in the mine is feasible. The rock layer movement during the open pit stoppage combined with the opening of the underground mine, simulated by using FLAC3D, gives a true picture of the stress and displacement states of the rock mass.

Keywords mining engineering; migration parameters; numerical analysis; rock movement

收稿日期: 2009-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50490274)

作者简介: 付玉华, 讲师, 研究方向为采矿与岩土工程, 电子信箱: fyh1369@126.com; 董陇军 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: S330730375A), 硕士, 研究方向为采矿与岩土工程, 电子信箱: csudlj@163.com

0 引言

随着露天浅部矿产资源的枯竭,许多露天矿山已经或将转入露天地下联合开采,其岩层的移动变形规律一直是许多学者关注的重要课题之一。联合开采主要存在以下几个问题:边坡岩体先后受到两次采动影响,且地下开采改变其应力分布,可能诱发边坡体的滑移;地下采矿形成众多采空区,因其顶板失稳冒落引起的塌陷给露天生产造成重大的安全隐患;在联合开采和露天边坡影响下,岩层的移动规律更加复杂,岩层移动角及移动范围确定更加困难^[1-6]。近年来,众多学者为露天地下联合开采技术的进步做出了重大贡献^[1-6],主要表现在露天转地下境界矿柱稳定性、岩层移动规律、边坡岩体滑移机制及变形监测等方面。

由于金属矿床岩体地质结构十分复杂,岩层的力学性质各种各样,边界条件也千差万别,因此由开采煤层引起的地表移动规律和预测理论一般不能直接用于地下金属矿床^[6-11]。目前,金属矿地下开采的地表移动预测研究还处于初步阶段。用于确定金属矿山移动范围的主要方法有工程类比法^[8]、理论分析法和数值分析法。工程类比法是目前金属矿山最常用,也是初步设计阶段岩层移动参数预测的首选方法,其预测的准确性不仅取决于工程间的可比度,还依赖于设计者对所类比工程的了解程度及其工程经验。理论分析法中,极限平衡法^[9]适用于用崩落法开采倾斜厚大矿体,特别是露天转地下开采沿边坡塌陷的情况;松动区岩层移动理论^[10]认为,地下开采松动区内将会发生沉陷或较大的位移,而在松动区外的岩体则有自成平衡的稳定趋势;此外还有随机介质理论法、影响曲线函数法、概率积分法、负指数函数法和典型曲线法等^[10]。数值分析法建立在客观反映原型和模拟工程发展过程力学效应的基础上,所建立的数值分析模型越能反映原型的客观条件、所选取的岩土体参数越准确,就越能准确地预计工程开挖引起的岩层移动。与传统的极限平衡方法相比,数值模拟方法不但能对岩体稳定性进行定量评价,而且能考虑岩体的不连续性、岩体应力-应变关系的非线性特性和力学性质方面的不均匀性和各向异性;数值模拟不但能够计算岩体的弹性变形状态,亦可计算岩体的破坏状态;不但可以考虑岩体中的地应力或区域构造应力条件,亦可考虑一些特定条件的作用与影响,如地下水渗流问题、岩体蠕变等;数值模拟可以追踪岩体破坏的过程,能够考虑边坡大变形问题,模拟边坡运动的特征与失稳过程等。基于上述优点,数值模拟方法在地表移动的研究中得到了广泛的应用。

永平铜矿是江西铜业第二大主体矿山,采、选生产能力10000t/d,从1982年采用露天方法开采至今已有20多年历史。矿山于2002年实施扩帮延深开采,但基于露天储量限制,矿山稳产年限仅8年左右,矿山预计2015年停产闭坑。为充分回收永平铜矿露天境界外的金属资源,尽可能延长矿山寿命,维持永平铜矿10000t/d生产规模,永平铜矿实施了露天转地下工程建设,即维持5000t/d露天规模,新增5000t/d地下开采规模。在露天转地下过程中,由于地采深入露天最终底部

境界以下,联合开采势必严重影响露天边坡稳定性、地面工程布置及其地采主要井巷工程的安全。因此,有必要对联合开采工程影响范围内的岩体稳定性进行深入的调查和研究,并计算圈定移动带范围。

1 FLAC3D 基本原理

FLAC3D在求解时采用空间离散、有限差分 and 动态求解方法。通过这3种方法,将连续介质运动方程转化为在离散单元节点上的离散形式的牛顿第二定律,从而这些差分方程可用显式有限差分技术求解。该方法不但避免了常应变六面体单元常会遇到的位移剪切锁定现象,而且使四面体单元的位移模式可充分适应一些本构关系要求。主要方程如下^[12]。

1) 本构方程

在FLAC3D中,假定在时间 Δt 内速度保持恒定,本构方程的增量表达式为

$$\Delta \check{\sigma}_{ij} = H_{ij}^*(\sigma_{ij}, \xi_{ij} \Delta t) \quad (1)$$

式中: $\Delta \check{\sigma}_{ij}$ 为共旋应力增量, H_{ij}^* 为一给定函数, σ_{ij} 为应力增量, ξ_{ij} 为应变率张量。

2) 节点速率

对于常应变四面体单元, v_i 为线性分布, n_j 在每个面上为常量,节点速率方程为

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^j n_j^l S^l \quad (2)$$

式中, V 为四面体体积; S 为四面体外表面; n_j 为外表面的单位法向量;上标 l 为节点 l 的变量, (l) 为面 l 的变量。

3) 运动方程

快速拉格朗日分析以节点为计算对象,在时域内求解。节点运动方程为

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t)}{m^l} \quad (3)$$

式中, $F_i^l(t)$ 为 t 时刻 l 节点在 i 方向的不平衡力分量,可由虚功原理导出; m^l 为 l 节点的集中质量,对于静态问题,采用虚拟质量以保证数值稳定。

4) 应变和应力

快速拉格朗日分析由速率求某时步的单元应变增量,根据应变增量,由本构方程求出应力增量,进而得到总应力。

5) 阻尼力

对于静态问题,不平衡力中加入非黏性阻尼,以使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态(即不平衡力接近0)。

2 永平铜矿露天转地下岩移数值分析

2.1 矿体赋存情况及计算剖面的选取

3[#]、7[#]勘探线位于露天转地下中心地带,其剖面图包含的矿体剖面范围较大,围岩类别较全面,可作为典型剖面用于数值分析。因此,本次数值模拟计算研究选取3[#]、7[#]勘探线剖面作为计算剖面。该勘探线附近区域内分布有II号矿体和IV号矿体,II号矿体位于IV号矿体西部,为矿区内最大矿体,赋

存于叶家湾组地层中。II号矿体呈似层状,沿倾向最大延伸2000m,一般>1000m,埋藏标高470~640m,矿体厚度最小0.66m,最大100.93m,平均厚度17.97m。IV矿体呈似层状、透镜状,分布于8~15勘探线间,走向长度1400m,最大延伸640m,矿体厚度最小0.85m,最大120.85m(垂直假厚),平均

14.21m。矿体走向北偏东,倾向南东,倾角较陡,约 70°左右。

2.2 计算参数的选取

岩体计算参数根据岩石力学实验结果选取(表 1)。充填体参数参考“永平铜矿西部排土场实验报告”中相关实验结果进行选取(表 2)。

表 1 岩石力学参数表

Table 1 Parameters of rock mechanics

岩石名称	单轴抗拉强度/MPa	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
灰岩	4.15	95.7	25.49	0.31	17.48	49.86
混合岩	4.83	97.6	21.91	0.19	19.08	47.29
铜矿体	3.36	64.4	18.67	0.25	12.94	46.22
石英斑岩	6.99	148.3	26.85	0.20	28.27	48.26
混合花岗岩	1.65	63.9	18.07	0.25	8.96	58.67
含矿砂岩	2.94	127.2	26.22	0.13	16.87	60.30

表 2 充填体计算参数

Table 2 Parameters of the filled body

充填材料	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa
废石	0.07967	0.33	0.04	30	0

2.3 计算模型

1) 3[#] 勘探线剖面计算模型。根据 3[#] 勘探线剖面图,加以必要的简化,建立稳定性计算的力学模型。以矿体为中心,计算域的上边界取至地表(露采境界),下边界取至-500m 标高;当假定移动角为 30°时可以得到一个假想的移动范围,以此为依据可确定计算模型的左右边界,如图 1 所示。



图 1 3# 勘探线剖面计算模型(单位:米)

Fig. 1 Profile of No. 3 prospecting line (unit: m)

2) 7# 勘探线剖面计算模型。根据 7# 勘探线剖面图,按前述类似方法对其进行必要的简化,建立稳定性计算的力学模型,如图 2 所示。

2.4 计算结果

2.4.1 3[#] 勘探线剖面模型计算结果分析

在该勘探线附近区域内主要分布有 II 号矿体,其与露天开采最终境界关系见图 1。分别对-100、-150、-200m 水平矿体开挖后的地表移动变形进行数值模拟计算,如表 3 所示。

1) 初始应力场分析

从垂直应力云图上看(图3),应力分层现象明显,最大垂直应力为 $-19.142 \times 10^7 \text{Pa}$,这与实际情况是一致的。

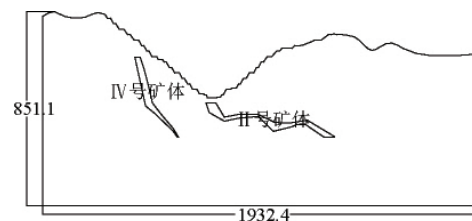


图 2 7# 勘探线剖面计算模型(单位:米)

Fig. 2 Profile of No. 7 prospecting line (unit: m)

表 3 模拟开采阶段划分与模拟计算过程

Table 3 Numerical simulation process for No. 3 line

阶段	开采中段/m	开采矿体	备注
1	-100	Ⅱ号矿体	矿房开采后即进行充填
2	-150	Ⅱ号矿体	矿房开采后即进行充填
3	-200	Ⅱ号矿体	矿房开采后即进行充填

2) 位移分析

计算结果表明,当-100m水平开采后,其最大下沉值为-0.219m,位于采动矿体上方地表中心位置;最大水平位移为-0.102m(指向露天坑内),位于-100m水平采区右上方露天边坡上。

当-150m 水平开采后,最大下沉值为-1.178m,位于采动矿体上方地表中心位置;最大水平位移为-0.79m(指向露天坑内),位于-150m 水平采区右上方露天边坡上。

当-200m水平开采后,最大下沉值为-1.616m,位于采动矿体上方地表中心位置;最大水平位移为-1.0131m(指向露天坑内),位于采区右上方露天边坡上(见图4、图5)。

计算结果表明,在 3[#] 勘探线位置上,最大垂直和水平位移均发生在 II 号矿体上盘岩体即露采东帮边坡岩体中,水平位移均指向露天坑内,并且随 II 号矿体开采的深入,垂直和水平位移显著增大,不利于边坡的稳定。

3) 塑性区分析

塑性应变的发生与发展表明岩体屈服或破坏的发生与

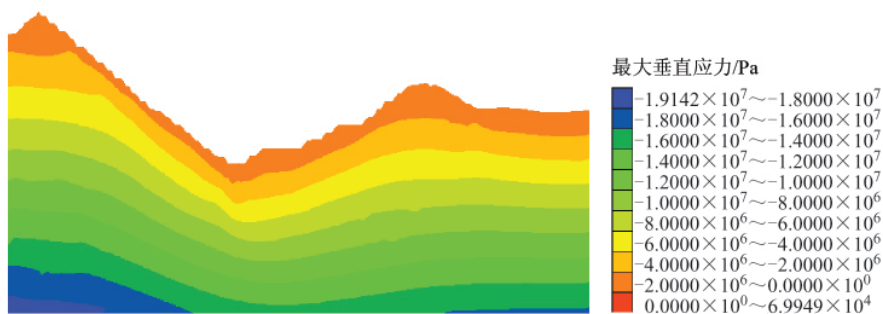


图 3 矿体开挖前垂直方向应力云图

Fig. 3 Vertical stress nephogram before mining

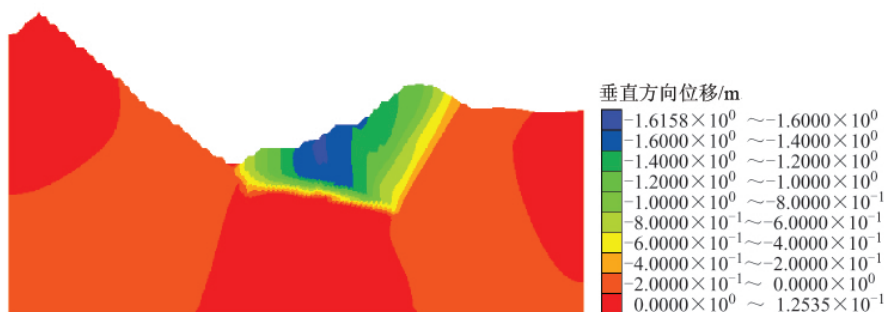


图 4 -200m 水平开采后垂直方向位移云图

Fig. 4 Vertical displacement nephogram for the level of -200m

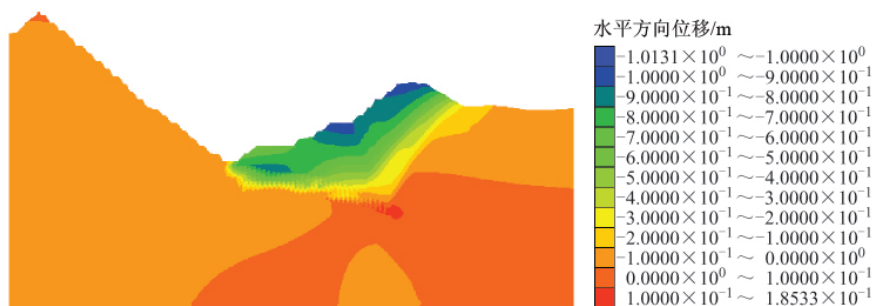


图 5 -200m 水平开采后水平方向位移云图

Fig. 5 Horizontal displacement nephogram for the level of -200m

发展的程度,表示屈服或破坏岩体内所发生的变形中不可恢复的残余变形分量。因此塑性应变的大小能够从本质上描述岩体的屈服或破坏发展过程,采用塑性区的相互贯通评判岩体的整体失稳破坏是比较合理的。

随着地下开采范围的延伸,塑性区的范围也随之扩大。塑性区主要集中在 II 号矿体上盘,由地下开采水平向地表扩展,这和前面位移分析的结果是一致的;-200m 水平开采后,塑性区分布如图 6 所示(图中蓝色为完整区域,红色为破坏区域,下同),几乎自采区穿至地表,表明此计算剖面露采边坡已处于极限稳定状态,采场应及时充填以控制和缓和围岩的变形和破坏。

4) 剖面移动角的确定

按照移动角来确定岩层的移动范围,根据有关设计规范^[9],具体的确定指标为:① 地表倾斜 i ,取临界变形值 $i=3\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$;② 地表曲率 k ,取临界变形值 $k=0.2\times 10^{-3}\text{m}^{-1}$;③ 地表水平变

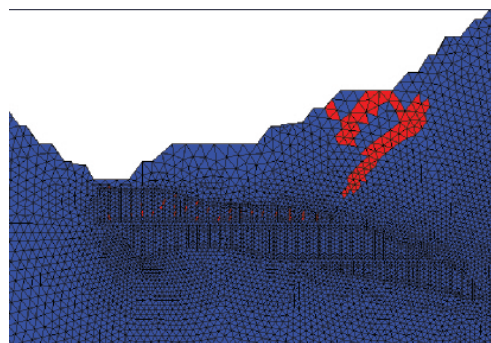


图 6 -200m 水平开采后塑性区分布

Fig. 6 Sheared section distribution for the level of -200m

形 ε ,取临界变形值 $\varepsilon=2\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

对于矿体上下盘, i 、 k 、 ε 三者任一指标在一点达到其临界值,则该点为地表破坏点。它与开采矿体水平的最外侧点连线(该连线以不穿过采空区为原则)与水平线的夹角,则为

移动角。数值开挖模拟按此原则确定移动角。

随着开采的进行,岩体移动范围不断发生变化。数值模拟计算结果表明:当-200m 水平开采后,矿体上盘移动角为 53° 。由于矿体下盘与露天境界底部设有隔离层,因此在按设计预留矿柱的情况下,其开采对下盘方向的影响不大。

2.4.2 7# 勘探线剖面模型计算结果分析

为分析两个矿体各自开采后对地表移动变形的影响,首先对 100,50,0,-50,-100,-150 和-200m 水平 IV 号矿体开采后的地表移动变形进行了数值模拟计算,再在此基础上对 II 号矿体进行开挖计算(见表 4)。

表 4 模拟开采阶段划分与模拟计算过程

Table 4 Numerical simulation process for No. 7 line

阶段	开采中段/m	开采矿体	备注
1	100	IV 号矿体	矿房开采后即充填
2	50	IV 号矿体	矿房开采后即充填
3	0	IV 号矿体	矿房开采后即充填
4	-50	IV 号矿体	矿房开采后即充填
5	-100	IV 号矿体	矿房开采后即充填
6	-150	IV 号矿体	矿房开采后即充填
7	-200	IV 号矿体	矿房开采后即充填
8	-100	II 号矿体	矿房开采后即充填
9	-150	II 号矿体	矿房开采后即充填
10	-200	II 号矿体	矿房开采后即充填

1) 位移分析

计算结果表明,当 100m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值仅为-0.005m,最大水平位移为 0.0025m。

当 50m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值为-0.02m,最大水平位移为 0.005m。

当 0m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值为-0.03m,最大水平位移为-0.015m。

当-50m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值为-0.03m,最大水平位移为-0.003m。

当-100m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值 0.2m,最大水平位移为-0.075m。

当-200m 水平 IV 号矿体开采后,最大下沉值为-0.39m,最大水平位移为-0.12m。

-100m 水平 II 号矿体待开采部分直接位于露天境界以下,矿体开采后其上部地表最大下沉值仅为-0.015m。

在-200m 水平 II 号矿体开采后,最大下沉值为-0.65m,最大水平位移为-0.38m。

IV 号矿体属急倾斜矿体,其上盘对应露天坑西部边坡。在其开采过程中,虽然岩体垂直和水平位移随开采深度的增加而增大,但总体上位移值都较小,最大垂直和水平位移均发生在露采西部边坡中部,位于 IV 号矿体上盘。

II 号矿体属缓倾斜矿体,其上盘对应露天坑东部边坡。在采完 IV 号矿体后开采 II 号矿体,垂直和位移值迅速增大,最

大垂直和水平位移发生的东部边坡。

总之,IV 号矿体的开采岩体移动量小,对边坡稳定影响较小,而 II 号矿体开采后岩体位移值大,且随开采的深入位移迅速增大,对东部边坡稳定性影响较大。因此,矿山在生产过程中应先采 IV 号矿体,后采 II 号矿体。

2) 塑性区分析

随着地下开采范围的扩大,塑性区的范围也随之扩大,IV 号矿体开采后,塑性区主要集中在 IV 号矿体附近范围内(见图 7);而 II 号矿体开采后,塑性区分布范围更广,并影响到地表,东部边坡存在潜在的滑移面(见图 8),这也表明 II 号矿体开采对地表的影响比 IV 号矿体要大得多。7# 勘探线剖面露采边坡在不同开采阶段处于稳定状态。

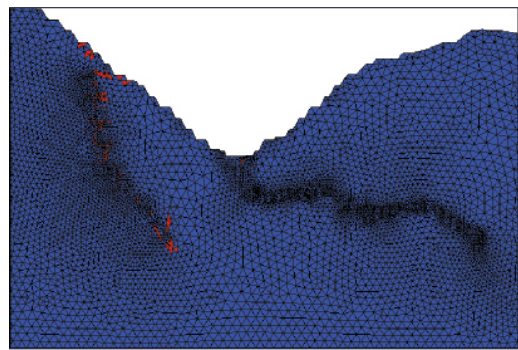


图 7 -200m 水平 IV 号矿体各中段开采完后塑性区分布

Fig. 7 Sheared section distribution for the level of -200m at IV

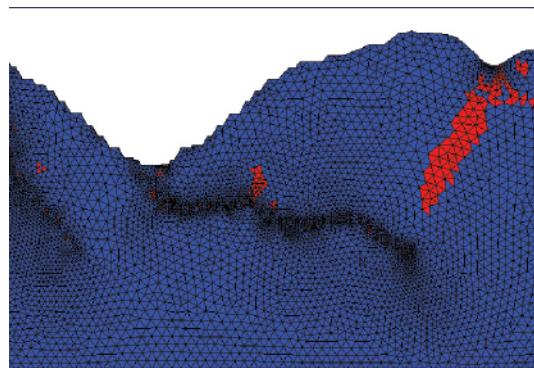


图 8 -200m 水平 II 号矿体开采完后塑性区分布

Fig. 8 Sheared section distribution for the level of -200m at II

3) 剖面移动角的确定

数值模拟计算结果表明:当-200m 水平开采后 II 号矿体上盘移动角为 55° ,和前面一样,由于 II 号矿体下盘与露天境界底部仅隔一隔离层,因此在按设计预留矿柱的情况下,其开采对下盘方向的影响不大;IV 号矿体开采后其上盘移动角为 59° ,下盘移动角为 63° 。

3 岩体移动角的确定

II 号矿体主要位于矿区东部,倾向东;IV 号矿体主要位于矿区西部,倾向东。因此数值法矿山岩层移动范围可以根

