

# 露天转地下采矿隔离层研究

张钦礼, 陈秋松, 胡威, 周登辉

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 隔离层是确保露天转地下安全开采的关键, 为确定姑山铁矿安全隔离层厚度, 运用 ANSYS 有限元分析软件进行数值模拟。首先对相同跨度 (27.5m) 不同隔离矿柱厚度与采空区高度的规则采空区进行数值模拟, 优选采空区控顶高度为 16m。对不同跨度和不同隔离矿柱厚度进行数值模拟, 得到了不同跨度下的安全隔离层厚度。选择 5 种具有代表性的理论计算方法计算隔离层的安全厚度, 其结果与数值模拟结果趋于相同。最后结合理论计算结果, 给出各个跨度下的安全隔离层厚度。以姑山铁矿为例, 推荐其露天转地下开采的隔离层厚度为 18m。

**关键词** 露天转地下; 隔离层; 理论计算; 数值模拟

**中图分类号** TD85

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.11.003

## Safety Thickness of Interval Layers for the Transition from Open Pit to Underground Mining

ZHANG Qinli, CHEN Qiusong, HU Wei, ZHOU Denghui

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Interval layers are a key to ensure the safety of the transition from open pit to underground mining. Through simulation, finite element software is used to get the safety thickness of interval layers for Gushan Iron Mining. Firstly, a numerical simulation is carried out by using the software of ANSYS on several regular goaf models which have the same span (27.5m), but different thicknesses of ore pillar and different heights of goaf, optimally selecting the goaf height as 16 meters. Then, numerical simulation are created on other goaf models with different spans and thicknesses of interval layers and safety thickness of interval layers are obtained for these cases. Then five typical theoretical calculation methods are chosen to calculate its safety thickness. The result is similar with the former one. At the last, by making a combination of these two results, a consequence for different spans is got. And it is recommend 18 meters as safety thickness of interval layers for Gushan Iron Mining.

**Keywords** open pit to underground mining; interval layer; theoretical calculation; numerical simulation

### 0 引言

随着露天开采的逐步推进, 露天境界内的矿产资源消耗殆尽, 许多矿山开始转入地下开采, 如大宝山铜铁矿、河南栾钼三道庄钼矿、石人沟铁矿等<sup>[1-2]</sup>。与此同时也带来诸多问题和隐患, 包括露天转地下过渡周期与生产衔接、过渡期回采顺序、隔离层<sup>[3]</sup>安全厚度确定等, 其中露天转地下隔离层是露天转地下安全开采的重要保证。隔离层过薄, 一旦坍塌, 必然造成重大人员伤亡和财产损失; 隔离层过厚, 虽然安全得到保证, 但也必将带来大量宝贵的矿产资源浪费。因此, 合理、安全、经济的隔离层厚度的确定是一项极其重要和复杂的科学研究课题<sup>[4-5]</sup>。针对隔离层厚度确定问题, 前人做了大量研

究, 如岩小明<sup>[6]</sup>, 李地元<sup>[7]</sup>等运用理论计算法和数值算法确定隔离层安全厚度, 但分析中未考虑矿体倾角和露天坑底境界影响。目前, 由于有限元法<sup>[8-10]</sup>在工程计算中具有强大优势, 许多有限元软件应运而生, 如 ANSYS、Andia、Nastran、SAP 等。这些软件被广泛应用于不同工程领域的力学计算与分析, 尤其是 ANSYS 软件, 由于其强大的分析功能和良好的用户界面, 已经成为许多行业公认的国际通用数值分析软件。鉴于此, 笔者采用 ANSYS 软件对姑山铁矿进行数值模拟分析, 考虑到矿房垂直走向布置, 对该矿坑底岩层稳定性进行垂直走向方向的二维动态模拟, 分析矿体开采时的安全隐患及危险源所在, 并结合 5 种典型的隔离层厚度计算方法加以验证和完善。

收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2013-01-18

基金项目: 科技部“十一五”科技支撑计划课题(2008BAB32B03)

作者简介: 张钦礼, 教授, 研究方向为采矿、充填及安全等, 电子信箱: zhangqinli@126.com

### 1 工程概况

姑山铁矿为 20 世纪中叶国家投资建设的露天开采矿山,隶属马钢集团姑山矿业有限责任公司。该矿露天开采生产规模为年产矿石 120 万 t,经过 50 多年的开采,露天境界内资源逐渐枯竭,按照目前的生产状况,露天开采还能维持 2~3a,届时露天坑将闭坑,为保证生产的延续,将逐步进入地下开采阶段。在此之前,存在一个露天转地下过渡期,如何在维持矿山总体生产能力的同时,保持过渡期露天开采和地下开采作业的安全,确定隔离层厚度是一个亟待解决的重大技术难题。

### 2 数值模拟确定隔离层

采空区结构参数是影响隔离矿柱稳定性的重要因素。其中采空区高度、跨度、隔离矿柱厚度等是影响隔离层矿柱的主要因素。因此以下将针对 3 个因素进行数值模拟计算。确定安全隔离层厚度。

#### 2.1 模型优化

(1) 以矿体产状、矿岩特性、回采过程和采空区状况作为模拟计算分析的基本条件,并进行必要的简化,简化后的矿

体倾角为 30°。

(2) 计算选定的载荷不随单元方向的改变而变化,始终保持着它们最初的方向,表面载荷作用于变形单元表面,大小等于上覆围岩的重量和设备重量之和。

(3) 模拟的采空区高度即为回采结束时的最大控顶高度(不充填和处理空区的高度)。

(4) 由于有限元程序的局限性,假设研究区内无地质构造运动的影响,原岩地应力为自重应力,各岩层为连续介质,但考虑到岩体节理裂隙及地下水的影响,在分析前必须对模型相关力学参数进行折减。

#### 2.2 模型参数确定

根据室内岩石力学实验得出各种岩石的物理力学性质,如表 1 所示。这些岩石力学参数是在实验室理想状态下得到的,现场工作中必须考虑节理裂隙和复杂的地下水的影响,因此在实际运用时必须进行合理的折减。参考相关岩石力学标准和前人的经验总结,对于不同参数,选取了合理的折减系数<sup>[6]</sup>,另外模拟中考虑单一岩性,得到能在数值模拟中运用的岩石力学参数见表 2 所示。

表 1 岩石试样力学性质

Table 1 Mechanical properties of rock specimen

试件岩性	试件编号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	备注
浅粒磷灰岩	Kx-1	121	3.060	9.079	2906.2	0.325	矿石
浅粒磷灰岩	Xy-2	221	4.580	6.895	2670.3	0.384	围岩夹石
含磷变粒岩	Xy-4	104	14.200	5.610	2866.4	0.304	
石英云母片岩	Xy-5	36	3.742	2.355	2722.2	0.231	
绿片岩	Dy-1	40	3.525	9.407	2721.4	0.220	
变粒磷灰岩	Dk-1	150	4.037	24.106	2692.3	0.327	致密坚硬
片麻岩	Dy-3	77	7.292	8.796	2599.8	0.440	
大理岩	Dy-5	165	5.440	20.335	2840.2	0.430	致密坚硬
半石墨片岩	Dy-7	128	6.592	9.033	2699.7	0.438	

表 2 折减后岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock after reduction

弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	黏结力/MPa	内摩擦角/(°)
8.21	53.90	3.56	0.325	8.04	48.33

#### 2.3 相同跨度不同采空区控顶高度的数值分析

通过统计计算得到该矿的采空区平均跨度为 27.5m,模拟中以跨度为 27.5m 建立模型对采空区控顶高度进行优化。根据采矿手册和国内外矿山开采经验,选择隔离层厚度从 18m 增加至 24m,采空区控顶高度从 12m 增加至 20m(不考虑充填的空区高度,模拟极限应力状态)进行数值模拟。模拟得结果如表 3 所示。

表 3 坑底不同采空区控顶高度的矿柱最大拉应力/最大压应力值(单位:MPa)

Table 3 Maximum tensile stress of pillar with the different roof heights of goaf (unit: MPa)

采空区控顶高度/m	隔离层厚/m			
	18	20	22	24
12	2.29/8.01	2.34/8.51	2.42/9.11	2.5/9.10
14	2.52/8.91	2.57/9.40	2.63/9.94	2.72/10.00
16	2.76/9.86	2.81/10.20	2.87/10.80	2.95/10.90
18	3.01/10.80	3.06/11.10	3.11/11.70	3.18/11.70
20	3.27/11.80	3.32/12.10	3.36/12.50	3.42/12.60

由表 3 可知,隔离层厚度和采空区控顶高度在此范围时,矿柱应力都在安全范围内,矿柱拉应力与采空区控顶高

度成正比。根据矿山生产实践,若控顶高度太大,则会降低安全生产系数,使工人作业不安全;若控顶高度太低,则会降低生产效率,增加工作难度。综合考虑上述因素,采空区控顶高度 16m 最为合适,因此以下模拟采空区控顶高度取为 16m。

### 2.4 相同采空区控顶高度不同跨度的数值分析

为了全面系统分析不同跨度下的安全隔离层厚度,对跨度在 5~50m 进行数值模拟。以 25m 跨度为例。建立跨度 25m,

采空区控顶高度 16m,厚度从 10m 到 18m 的 6 个规则的采空区力学模型,模拟不同跨度,不同隔离层厚度时,隔离层及其周边岩体的受力状况,以便利用岩体的强度指标对隔离层的安全状态进行分析。获得该情况下的安全的隔离层厚度。

图 1 和图 2 中(a)图为整体图,(b)图是为便于看清应力分布情况而进行局部放大图,图例中颜色由蓝至红对应应力由小变大。

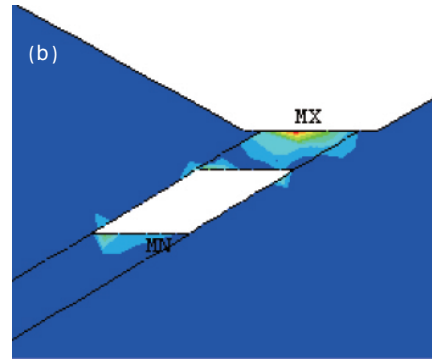
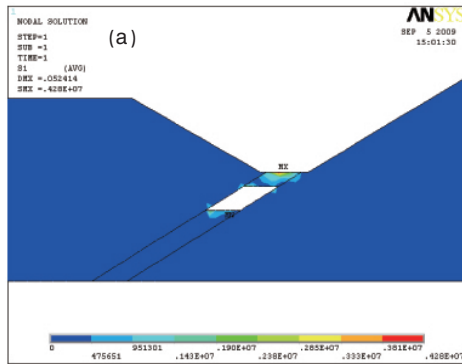


图 1 顶板拉应力(隔离层厚度 10m)

Fig. 1 Tensile stress of roof (thickness of 10m)

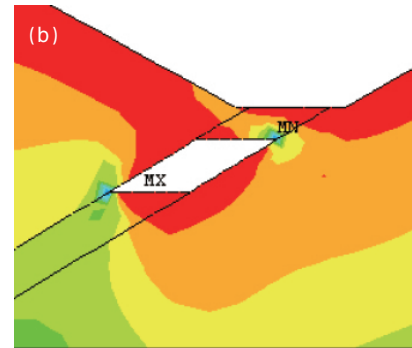
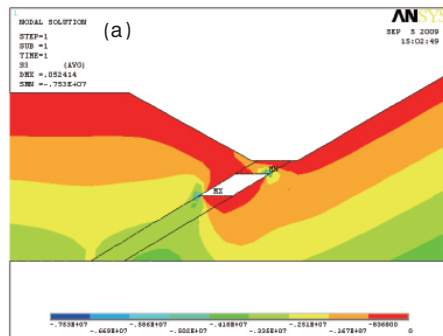


图 2 顶板压应力(隔离层厚度 10m)

Fig. 2 Compressive stress of roof (thickness of 10m)

从图 1、图 2 还可以看出,矿柱最大拉应力出现在顶板中央,为 4.28MPa,超过了岩石抗拉强度(3.56MPa),因此在矿柱中央将出现拉伸破坏;压应力则分布范围较广,出现在矿柱的大部分范围内,其中最大压应力集中在矿柱与下盘围岩接触部位,其值为 7.53MPa,远小于隔离层矿柱本身的抗压强度(53.90MPa)。因此矿柱中央的拉应力是关系采空区安全的决定性因素。

同理,采空区跨度为 25m 时,不同矿柱厚度对应的最大拉应力和压应力值见表 4,在矿柱破坏的应力中,拉应力占主导地位,并且根据最大拉应力曲线以及岩体强度破坏准则,可直观地从表中获得该跨度下顶板的最安全厚度大小为 15m。

表 4 采空区跨度 25m 时不同矿柱厚度的最大应力值(单位:MPa)  
Table 4 Maximum stress of different thickness pillar with the span of 25m (unit: MPa)

	矿柱厚度/m					
	10	12	14	15	16	18
最大拉应力	4.28	3.94	3.18	2.86	3.32	3.48
最大压应力	7.53	12.80	13.00	12.20	15.70	17.40

按照上述思路,通过不同跨度模型的模拟同样得出了 5~50m 跨度下,顶板承受的最小拉应力对应的隔离矿柱的厚度(即安全系数最大的隔离层厚度)如表 5 所示。

从表 5 可以看出,当跨度大于 40m 时,安全系数太低,无

论多大隔离层厚度都无法保证安全回采, 因此在实际工作中, 避免跨度大于 40m。

表 5 安全系数最大对应的矿柱安全厚度

Table 5 Pillar thickness corresponding to the maximum safety factor

采空区跨度/m	最小拉应力/MPa	隔离层厚度/m	安全系数
5	2.90	3	1.23
10	3.29	5	1.08
15	2.39	12	1.49
20	2.48	12	1.44
25	2.86	15	1.24
30	3.00	16	1.19
34	3.38	20	1.05
40	3.70	22	0.96
45	4.05	24	0.88
50	4.08	24	0.87

### 3 理论计算与数值模拟结果比较

针对露天地下开采隔离层安全厚度的计算方法有许多种, 目前主要有厚跨比法、荷载传递交汇线法、结构力学简化梁法、长宽比梁板计算法、普氏拱法<sup>[11-14]</sup>等。

通过理论计算的隔离层安全厚度值如表 6 所示, 为便于直观观察分析, 将不同方法得到的结果绘成曲线图, 见图 3。

表 6 理论计算与数值模拟所得安全隔离层厚度

Table 6 Security barrier thicknesses of theoretical calculations and numerical simulations

采空区 跨度/m	理论方法与数值模拟的顶板安全厚度/m					
	厚跨 比法	荷载传 递交汇 线法	结构力 学简化 梁法	长宽比 梁板计 算法	普氏 拱法	数值模 拟计算 法
10	6.5	7.1	2.3	6.41	4.8	5
15	9.75	10.7	3.9	9.6	6.8	12
18	—	—	5.2	11.5	8.2	—
20	13.0	14.3	6.1	12.8	9	12
25	16.25	17.9	—	15.5	11.4	15
26	—	—	9.4	—	—	—
30	19.5	21.4	12.0	16.8	13.6	16
34	—	—	—	—	—	20
35	22.75	25.0	15.9	18.1	15.2	—
40	26.0	28.6	20.3	19.4	17	22
45	29.25	32.1	25.3	22.8	18.6	24
48	—	—	—	—	—	—
50	32.5	35.7	30.8	26.2	20.2	24

分析表 6 和图 3, 可见理论计算与数值模拟结果较为接近, 并且从图 3 可见, 通过厚跨比法、数值模拟法、荷载传递交汇线法、长宽比梁板法等所得的安全隔离层厚度值在采空区跨度较小时较大; 而在采空区跨度较大时, 通过数值模拟

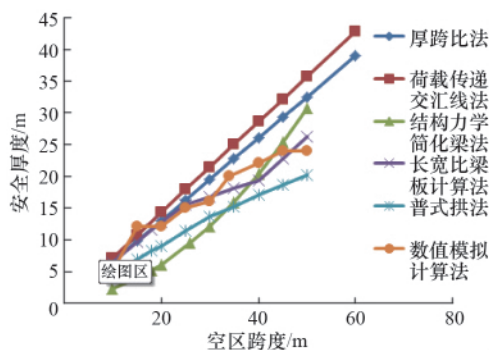


图 3 采空区跨度与隔离层安全厚度的关系曲线

Fig. 3 Relation curves between the security thickness of interval layer and goaf span

法、长宽比梁板法、普氏拱法所得的安全隔离层厚度计算值则较小。据此, 数值分析结果在不同跨度条件下, 需据图 3 规律进行适当增减, 综合分析安全、经济因素, 最终确定当岩层条件较好时, 各采空区跨度下的安全隔离层厚度推荐值如表 7 所示。根据姑山铁矿实际开采跨度, 推荐其隔离层厚度为 18m。

表 7 采空区跨度与隔离层安全厚度推荐值

Table 7 Recommended values for the security thickness of interval layer and goaf span

空区跨度/m	10	15	20	25	30	35	40	45	50
隔离层安全厚度/m	7	11	12.5	15	18	22	24	30	31

### 4 结论

(1) 通过数值模拟得到了不同跨度下的露天转地下安全隔离层厚度, 为矿山安全开采提供了参考, 对矿山生产有重要意义。

(2) 通过理论计算验证了数值模拟计算的正确性, 并综合考虑两者得到更加完善、准确的不同空区跨度的安全隔离层厚度推荐值, 建立了安全隔离层厚度评价系统。

(3) 根据矿山实际开采跨度 (27.5m), 推荐姑山铁矿的隔离层厚度为 18m。

### 参考文献 (References)

[1] 卢宏建, 高永涛, 吴顺川, 等. 石人沟铁矿露天转地下开采生产规模优化[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 968-971.  
Lu Hongjian, Gao Yongtao, Wu Shunchuan, et al. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(9): 968-971.

[2] 陆广, 罗周全, 刘晓明等. 露天转地下开采隔离层厚度安全分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 132-137.  
Lu Guang, Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, et al. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 132-137.

[3] 谭红艳, 蒋小珍. 广州白云采空区稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(3): 445-449.  
Tan Hongyan, Jiang Xiaozhen. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 445-449.

- [4] 陈文林, 张永彬, 杨天鸿. 露天转地下境界矿柱稳定性评价[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 260-265.  
Chen Wenling, Zhang Yongbin, Yang Tianhong. Underground Space, 2004, 24(2): 260-265.
- [5] 张贺, 李若彬. 重有色金属冶炼设计手册(铅锌铋卷, 锌冶炼篇)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.  
Zhang He, Li Ruobin. Heavy non-ferrous metal smelting design manual (lead, zinc and bismuth volume, zinc smelting articles) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [6] 岩小明, 李夕兵, 李地元, 等. 露天转地下矿室隔离层安全厚度的确定[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 666-671.  
Yan Xiaoming, Li Xibing, Li Diyuan, et al. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 666-671.
- [7] 李元辉, 南世卿. 露天转地下隔离层稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 276-283.  
Li Yuanhui, Nan Shiqing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 276-283.
- [8] 陈尚桥, 黄润秋. 基础下浅埋地下洞室安全顶板厚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 961-966.  
Chen Shangqiao, Huang Runqiu. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1): 961-966.
- [9] 李九红, 杨菊生. 岩体损伤-弹塑性非线性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 707-711.  
Li Jiuhong, Yang Jusheng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 707-711.
- [10] 邱贤德, 黄木坤, 王心飞. 数值计算在采空区稳定性评价中的运用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002(4): 105-110.  
Qiu Xiande, Huang Mukun, Wang Xinfei. Ground Pressure and Strata Control, 2002(4): 105-110.
- [11] 岩小明, 李夕兵, 郭雷, 等. 露天地下开采隔离层稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1682-1686.  
Yan Xiaoming, Li Xibing, Guo Lei, et al. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1682-1686.
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
Cai Meifeng, He Manchao, Liu Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [13] Swirl G M, Reddish D J. Stability problems associated with all abandoned ironstone mine [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(3): 227-239.
- [14] Nomikos P P, Sofianos A I, Tsoutrelis C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2002, 39(1): 79-94.

(责任编辑 吴晓丽)

## ·学术动态·



## 欢迎申办“中国科技论坛”

“中国科技论坛”是由中国科协主办、申报单位承办、以委托方式实施完成的学术交流项目。

项目数量: 2013年举办6次。

经费额度: 18万元/次。

项目内容: 针对国家“十二五”科技发展规划中农业、能源、信息、资源环境、人口健康、材料、制造与工程、综合交叉等8个关键领域的重大科学问题而专门搭建的交流平台,旨在通过跨学科、跨部门的学术研讨,推动产学研政优势互补,促进重大科技领域的信息交流与多元化协作,推动产学研协同创新、合作创新和集成创新。

### 欢迎相关学科带头人、行业领军人物担任学术召集人

申报方式: 根据《中国科技论坛项目管理及实施办法(试行)》有关要求申报。申报单位为全国学会、地方科协及具有独立法人资格的科研院所、高等院校等单位。

联系人: 中国科协学会学术部 殷骁

电话: 010-68515738

网址: <http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/14500829.html>