

文章编号: 1674-9669(2014)01-0086-05
DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2014.01.017

露采平台安全厚度与隐伏采空区跨度关系的数值模拟研究

康伟权¹, 袁海平^{1,2}, 吴贤振¹, 刘建伟¹, 尹丽冰¹

(1.江西理工大学资源与环境工程学院,江西 赣州 341000;2.合肥工业大学土木与水利工程学院,合肥 230009)

摘要: 准确掌握露采平台安全及下部隐伏采空区的稳定性,是矿山进行安全生产工作的重要前提。为了确定某矿露采平台下部隐伏采空区跨度与露采平台安全厚度之间的关系,通过室内岩石力学实验,获取岩样相应的物理力学参数;结合摩尔-库仑强度破坏准则,应用 FLAC3D 数值计算软件,建立三维模型;在一定的空区走向长度(30 m)和不同的跨度条件下,以每次 10 m 的工程进度向地表方向模拟开挖,分析空区顶板临界安全厚度与空区跨度和岩体抗拉强度的相互关系,给出了露采平台安全厚度与空区跨度关系和抗拉强度三者的线性拟合公式,为类似矿山的采矿工作提供借鉴。

关键词: 隐伏采空区;平台安全厚度;FLAC3D;露天开采

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A

Numerical analysis on the relationship between safe thickness of surface mine bench and hidden goaf span

KANG Wei-quan¹, YUAN Hai-ping^{1,2}, WU Xian-zhen¹, LIU Jian-wei¹, YIN Li-bing¹

(1.School of Resource and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Accurate understanding of the open-pit mining bench security and mined-out area stability is an important prerequisite for mining safety. A series of rock mechanics experiments were conducted to obtain the basic physic mechanical parameters of ore rock samples and analyze the relationship between safe thickness of open-pit mining platform and hidden goaf span. A three-dimensional simulation model was built up by FLAC3D based on the conditions of goaf area span under the specified length of 30 meters of goaf area with the progress of 10 meters every time to excavate up the worked out section. A linear fitting formula was put forward.

Key words: hidden goaf; safe thickness of the bench; FLAC3D; surface mining

收稿日期: 2013-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004007); 江西省自然科学基金资助项目(20114BAB216026); 江西理工大学研究生创新专项资金项目(YC2012-X05)

作者简介: 康伟权(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩体稳定性研究, E-mail: 570242984@qq.com.

通信作者: 吴贤振(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事采矿工程、岩石力学方面的教学与科研, E-mail: wxz2001666@sina.com.

0 引言

对于地下转露天开采的矿山,地采遗留下的隐伏采空区是露天开采工作的重大隐患^[1],为了保证矿山持续发展和安全^[2]开采,找出露采平台安全厚度与隐伏采空区跨度之间的规律^[3]愈发重要,尤其对于危险采空区,难以实行地下实时安全监测^[4],数值模拟^[5]可作为分析露采平台安全厚度的一种有效手段.薛涛等^[6]从应力和位移多角度,考虑空区与相邻空区相互之间的影响作用,分析开采境界下空区的稳定性状态;李地元等^[7]综合采用结构力学梁法、鲁佩涅依特理论估算法等多种方法计算,并对理论计算结果和三维数值模拟分析结果进行比较,得出露采平台安全厚度与隐伏采空区跨度的对应关系,等等^[8].国内外对于露采平台安全厚度与隐伏采空区^[9]跨度关系的相关

研究并不多,了解隐伏空区跨度与露采平台安全厚度的关系对实际工程具有一定的指导意义.

以珠江某钨钼矿为例,运用 FLAC3D 软件^[10]进行数值模拟稳定性分析,得出露采平台临界安全厚度隐伏空区跨度之间的对应关系,提出了采空区跨度与露采平台安全厚度对应线性拟合关系.

1 岩石物理力学参数测定

矿区内的岩体主要是在燕山旋回早期第 2 阶段第 3 次岩浆侵入形成的花岗岩,岩性多为中细粒白云母花岗岩及少量黑云母花岗岩,成为钨、钼、铋、铍、钽、铌等有色金属和稀有金属矿床的成矿母岩.根据室内岩石力学参数试验测试与分析结果,可获得典型岩样物理参数及力学参数,拟取用 5 种岩体不同的抗拉强度参数进行研究,如表 1 所示.

表 1 矿岩物理力学参数

岩石名称	天然密度 /(kg·m ⁻³)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比	黏结力 /MPa	内摩擦角 /(°)
花岗岩 1 [#]	2 561.007	142.058	6.775	33.643	0.226	3.146	32.18
花岗岩 2 [#]	2 576.515	139.459	6.859	24.219	0.213	3.217	32.34
花岗岩 3 [#]	2 541.284	146.722	5.918	26.569	0.222	3.212	32.20
花岗岩 4 [#]	2 547.718	143.564	6.021	68.556	0.241	3.189	33.11
花岗岩 5 [#]	2 541.714	138.488	6.339	15.230	0.226	3.168	32.37

2 数值模拟方案

2.1 模型建立

根据计算精度与计算机计算能力的要求,选择数值计算模型^[11]区域范围,如图 1 所示.网格划分采用

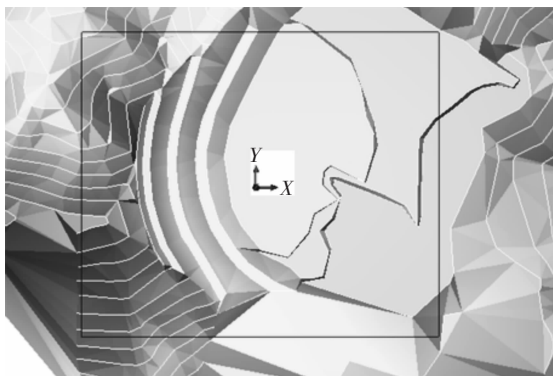


图 1 模型计算域选取

四面体单元^[12].为便于找出隐伏空区几何参数与露采平台厚度关系规律,计算模型略作简化.如图 2 所示,

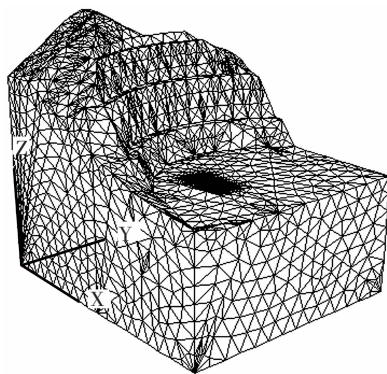


图 2 整体模型切割后的计算模型

模型四面体单元数为 472 635 个,节点数 80 551 个.模型底面和四周均受链杆约束,顶面受荷载约束.

2.2 方案设计

一般情况下完整顶板其破坏方式有拉伸破坏和剪切破坏 2 种.由于岩体抗拉强度很低,一般会先发生拉伸破坏,然后拉裂隙扩展并与地表贯通而后发生冲剪破坏^[13-15].实际空区形状很不规整,为了简化计算,这里将采空区视为矩形洞室进行考虑,设计计算方案如表 2 所示.

表 2 计算方案参数表

方案 编号	空场跨度 /m	走向长度 /m	空区开挖进度 /m		
			步骤 1	步骤 2	步骤 3
1	6	30	10	20	30
2	10	30	10	20	30
3	16	30	10	20	30
4	20	30	10	20	30
5	30	30	10	20	30
6	60	30	10	20	30

由于钻孔设备、运输汽车、人员及辅助设备
外部荷载的存在，采空区中央上部平台载入合
计 0.5 MPa 荷载，以摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度理
论准则^[16]为数值模拟计算的本构模型，依据岩体的强
度指标对顶板安全状况进行判别.观测和采集模型中
破坏区关键点数据.

3 数值模拟结果与分析

3.1 空区顶板应力和位移分析

(1)主应力分布规律.限于篇幅原因,仅将方案 6
各步骤结果示列如下.如图 3 所示给出了方案 6 各开
挖进度完成后的最大与最小主应力 σ_1, σ_3 分布情况.
从模拟结果看出,主应力场具有以下特征:①空区形
成后,与周围环境应力场比较,附近围岩应力释放明
显.在空区顶板出现明显的拉应力集中区,且随着采
空区高度的增加,顶板的拉应力逐渐增大,顶板拉应
力大部分位于顶板中间附近.各开采步所形成空区都
具有这种规律性;②空区顶板中央形成圆弧状的应
力等值线拱,靠近顶板中央为拉应力,往上等值线拱
逐渐变大,拉应力减小,最终变为压应力.

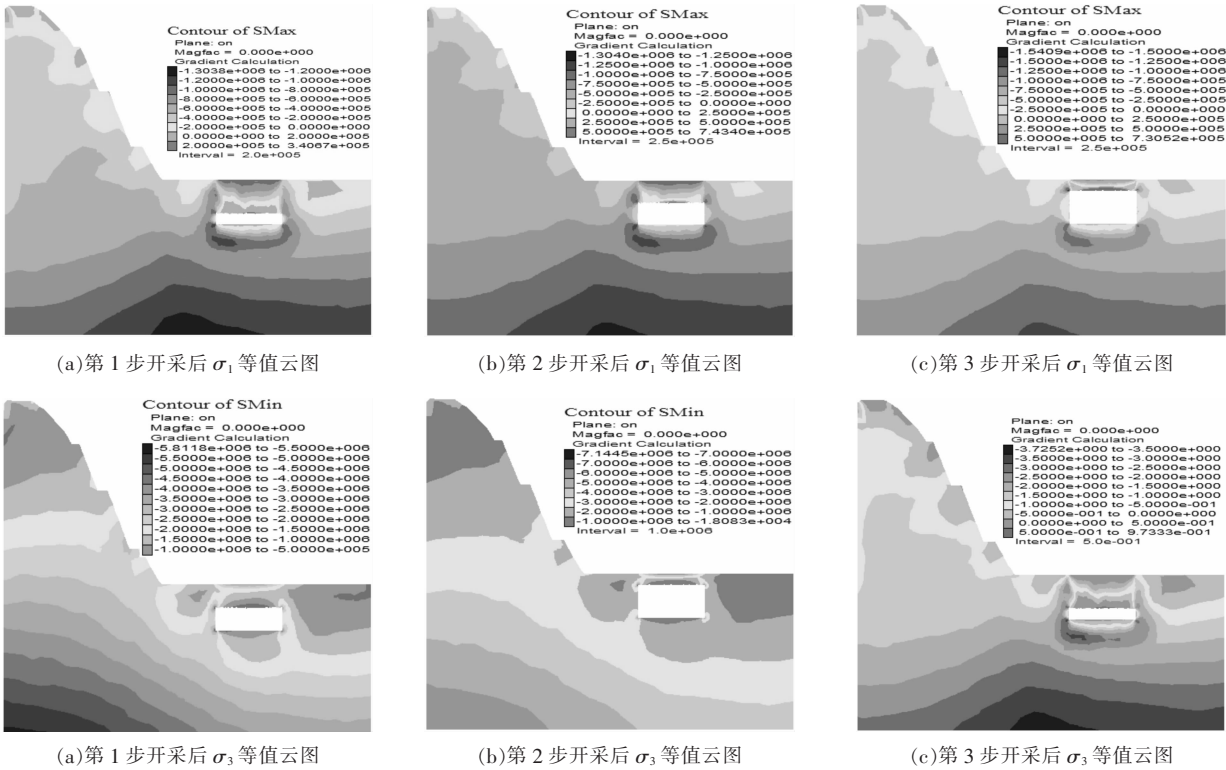


图 3 方案 6 各开采步完成后的最大与最小主应力分布情况

(2)剪应力分布规律.在空区周边产生剪应力集
中,所不同的是最大应力集中区域不是分布在顶部或
侧壁的中央,而是在空区的 4 个隅角处.在空区的右
上角和左下角为正剪应力集中,左上角和右下角为负
剪应力集中.

(3)围岩变形与位移特征.空区变形随空区空间
的增大而不断加剧,甚至出现顶板冒落.分布特征为:
空区周边围岩的位移最大,往外距离空区边界越远,

围岩位移就越小,且顶部围岩位移比底部的要大得
多,围岩移动方向均指向空区.

3.2 露采平台安全厚度与隐伏空区跨度关系分析

一般来说,隐伏采空区上覆岩体的破坏方式主要
有 2 种:一种为在上部荷载作用下顶板两端围岩产生
大变形导致上部覆岩发生剪切破坏,顶板整体滑落;
一种为顶板中央产生拉应力超出岩体抗拉强度,出现
冒顶、累积性破坏最后发展到地表形成大面积塌陷.

根据模拟结果,采空区顶板破坏方式起决定性作用的
是拉伸破坏.方案 6 各开采步围岩的拉伸不安全感等

值云图如图 4 所示.
拉伸不安全感是指岩体的拉应力与抗拉强度的比

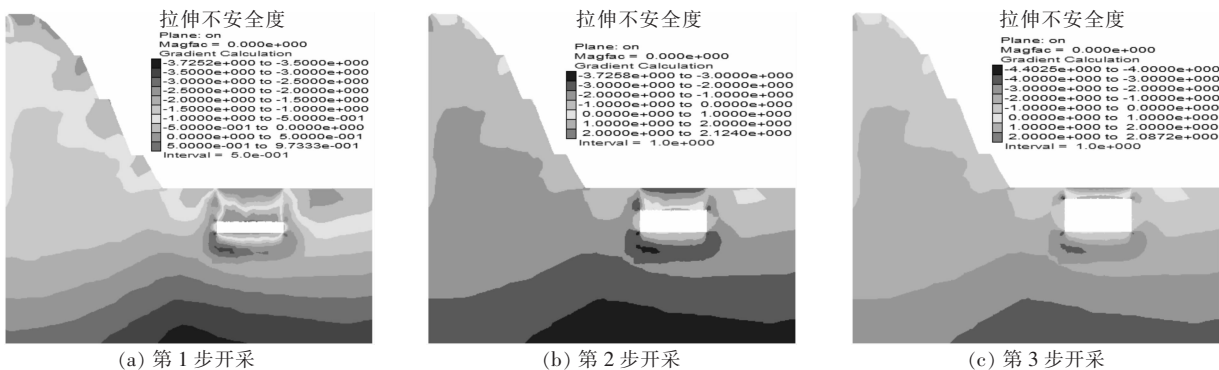


图 4 方案 6 各开采步拉伸不安全感等值云图

值乘以储备安全度,用 F_t 表示.当 $F_t > 1$ 时,露采平台将
发生破坏;当 $F_t < 1$ 时,露采平台处于稳定状态,当 $F_t = 1$
时,露采平台处于临界状态.各方案结果如表 3 所示.

利用 FLAC3D 数值模拟软件计算,地下空区储

备安全度取值 2.0 时,分别对 6 种方案用线性插值法
求出 $F_t = 1$ 时,对应露采平台的临界安全厚度值和空
区跨度值,5 组数据 6 种方案的线性回归函数关系曲
线如图 5 所示.

表 3 各计算方案结果

方案 编号	开挖 步骤	露采平台厚度 /m	空区跨度 /m	空区高度 /m	拉伸不安全感				
					花岗岩 1 [#]	花岗岩 2 [#]	花岗岩 3 [#]	花岗岩 4 [#]	花岗岩 5 [#]
1	1	30	6	10	0.587 56	0.580 48	0.672 64	0.661 16	0.031 39
1	2	20	6	20	0.709 40	0.700 84	0.812 12	0.798 24	0.586 66
1	3	10	6	30	1.494 68	1.477 28	1.715 48	1.686 44	1.138 92
2	1	30	10	10	0.782 26	0.772 80	0.790 48	0.738 44	0.029 39
2	2	20	10	20	0.756 72	0.747 56	1.106 08	0.832 64	0.587 66
2	3	10	10	30	1.341 12	1.324 88	1.680 36	1.078 44	1.151 92
3	1	30	16	10	0.739 96	0.731 00	0.895 52	0.696 10	0.069 03
3	2	20	16	20	0.958 44	0.946 84	0.866 32	0.833 84	0.646 94
3	3	10	16	30	1.725 92	1.726 88	1.535 28	1.509 04	1.221 86
4	1	30	20	10	0.559 92	0.895 80	0.474 40	0.560 48	/
4	2	20	20	20	0.906 80	1.097 20	0.641 00	0.811 48	0.648 03
4	3	10	20	30	1.110 64	1.644 04	1.038 12	1.490 16	1.331 66
5	1	30	30	10	0.498 08	0.492 08	0.570 24	0.630 04	0.050 02
5	2	20	30	20	0.721 16	0.712 44	0.825 60	1.020 36	1.178 60
5	3	10	30	30	1.324 32	1.308 28	1.516 04	1.249 72	2.000 00
6	1	30	60	10	0.870 10	0.859 56	0.996 10	0.979 06	0.636 94
6	2	20	60	20	1.010 41	0.998 18	1.156 73	1.136 94	1.865 17
6	3	10	60	30	1.033 86	1.021 34	1.183 57	1.163 33	1.995 29

注:“/”表示数据异常.

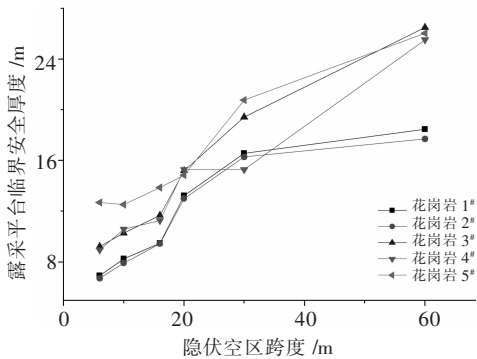


图 5 露采平台临界安全厚度与隐伏空区跨度的关系

露采平台的临界安全厚度值与隐伏空区跨度及
抗拉强度的线性回归函数如式(1)所示.

$$y = (-0.122\ 8\sigma_c + 1.048\ 5)x - 0.586\ 1\sigma_c + 10.976\quad (1)$$

式(1)中: x 为隐伏采空区跨度, m; y 为露采平台临界
安全厚度, m; σ_c 为岩体抗拉强度, MPa.

由此,可以得出露天平台安全厚度与隐伏采空区
跨度及抗拉强度的关系,如式(2)所示.

$$D > (-0.122\ 8\sigma_c + 1.048\ 5)x - 0.586\ 1\sigma_c + 10.976\quad (2)$$

式(2)中, D 表示露采平台安全厚度, m.

4 结 论

(1)针对矿山地下转露天开采生产中存在隐伏采空区的安全隐患问题,应用FLAC3D数值计算软件,提出了露采平台安全厚度与空区跨度关系的线性拟合公式,为类似岩性和生产条件矿山的采矿工作提供借鉴意义。

(2)由于矿山现场存在地下水、雨水、自然风化等不确定因素,会使岩石的各项力学强度有所减弱,对研究结果造成一定的影响;同时论文仅做了静荷载分析,对于动态荷载作用(如爆破震动)未进行分析,需要在今后的工作中深入研究。

参考文献:

- [1] Cooley T. Geological and geotechnical context of cover collapse and subsidence in mid-continent US clay-mantled karst[J]. Environmental Geology, 2002, 42: 469-475.
- [2] Stump D. Minimizing the adverse impacts of surface coal mining on the environment[J]. World Water & Environmental Resources Congress, 2003(6): 1-9.
- [3] Swift G M, Reddish D J. Stability problems associated with an abandoned ironstone mine[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2002, 61(3): 227-239.
- [4] 刘希灵, 李夕兵, 宫凤强, 等. 露天开采台阶面下伏空区安全隔离层厚度及声发射监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 3357-3362.
- [5] Singh G S P, Singh U K, Murthy V M S R. Application of numerical modeling for strata control in mines[J]. Geotech Geol Eng, 2010, 28: 513-524.
- [6] 薛涛, 李夕兵, 周士霖, 等. 露天矿开采境界内下部复杂隐伏采空区上部稳定性研究[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(2): 29-31.
- [7] 李地元, 李夕兵, 赵国彦. 露天开采下地下采空区顶板安全厚度的确定[J]. 露天采矿技术, 2005(5): 17-20.
- [8] 张敏思, 朱万成, 侯召松, 等. 空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 543-548.
- [9] Niehoff J. The use of geophysical methods to detect abandoned mine workings[C]// James W, Niehoff J. The progress of geological and geotechnical engineering in colorado at the cusp of a new decade. Lakewood: ASCE, 2010: 119-128.
- [10] Zarnani S, Srisakandakumar S, Arenson L, et al. The use of FLAC software for assessing deformation rates during ice excavation for open pit mining in glaciers[J]. Cold Regions Engineering, 2012(8): 705-714.
- [11] 廖秋林, 曾钱帮. 基于ANSYS平台复杂地质体FLAC3D模型的自动生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1010-1013.
- [12] GUAN Zhen-qun, SONG Cao, GU Yuan-xian. The boundary recovery and sliver elimination algorithms of three-dimensional constrained delaunay triangulation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006, 68(2): 192-209.
- [13] 张耀平. 矿山空区诱发的岩移特征及覆盖层冒落效应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [14] 黄晖. 缓倾斜硬岩矿床采空区顶板冒落规律研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
- [15] 张耀平, 曹平, 袁海平, 等. 复杂采空区稳定性数值模拟分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(2): 233-238.
- [16] 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.