文章编号:1673-0062(2008)04-0015-07

深井开采回采顺序数值模拟优化研究

刘晓明1,杨承祥1,2,罗周全1

(1. 中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083;2. 金口岭铜矿,安徽 铜陵 244000)

摘 要:采用大型矿业软件 Datamine 构建了冬瓜山矿的地表、岩层、矿体及块段模型;研究了 Datamine 块段模型与 Flac^{3D}计算模型的数据结构、耦合模式及方法,成功 地将块段模型转换成数值计算模型.针对冬瓜山深井缓倾斜矿体复杂的开采技术条件,并考虑日产万吨生产能力和主要回采次序要求,设计了两种可行的回采顺序模拟 方案,开展了冬瓜山深井开采回采顺序的数值模拟优化研究,分析了不同方案应力、 位移和塑性区的分布规律,提出了优化的回采顺序方案. 关键词:深井开采;回采顺序;Flac^{3D};Datamine;数值模拟 中图分类号:0319.56 文献标识码:A

Numerical Simulation Optimization of Mining Sequence in Deep Mining

LIU Xiao-ming¹, YANG Cheng-xiang^{1,2}, LUO Zhou-quan¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China; 2. Jinkouling Copper Mine, Tongling, Anhui 244000, China)

Abstract: By the aid of the international mining software Datamine, the 3D models of the surface, rock layer, ore body and block of Donggua Shan Copper Mine were constructed. The data construction, pattern and method of coupling Datamine and Flac^{3D} were studied and the block model was transformed into computing model successfully. According to complicated exploitation condition and the principle of mining sequence simulation plan in Donggua Shan Copper Mine, two feasible plans of mining sequence in Donggua Shan Copper Mine, two feasible plans of mining sequence in Donggua Shan Copper Mine was carried out. The stress fields, displacement field and plastic area distribution between two kinds of plan were analyzed, and the best mining sequence was bring forward finally.

Key words: deep mining; mining order; Flac3D; Datamine; numerical simulation

收稿日期:2008-10-26

作者简介:刘晓明(1982-),男,江西新余人,中南大学博士研究生.主要研究方向:矿床深井开采与安全预警数字 化技术.

基金项目:"十一五"国家科技支撑计划专题资助项目(2007BAK22B04-12;2006BAB02B05-01-02-01)

深井开采中,采取合理的矿床开采顺序,有利 于改善岩体的应力分布状态,控制由于多次采动 影响而造成的应力增高带相互重叠的程度[1-3]. 因此,开展回采顺序数值模拟优化研究,对保证矿 山安全生产具有重要的意义[4]. 准确的力学计算 模型是进行数值模拟研究的基础,然而在数值模 拟分析中,往往存在模型建立、单元划分等前处理 工作烦琐,甚至难于进行的致命弱点.本文针对冬 瓜山深井缓倾斜矿体复杂的开采技术条件,综合 考虑保持稳定的日产万吨生产能力和确保回采区 域岩体稳定的要求. 采用大型矿业软件 Datamine 建立了冬瓜山三维数值模拟前处理块段模 型^[5-9],并通过数据转换的方式成功地将块段模 型转换为有限元 FLAC^{3D}数值计算力学模型,对矿 床不同回采顺序引起的应力、位移及塑性区分布 规律进行了对比分析,优选方案二为矿山最终回 采顺序.

1 基于 Datamine 的矿山地学模型构建

冬瓜山矿床是目前国内发现的首例深埋特大型铜矿床.矿体赋存于-690m~-1007m,呈层状产出,平均倾角20°,矿体走向长1810m,水平投影宽度204~882m,平均厚度32m,矿岩均致密坚硬,节理裂隙不发育,稳定性好.矿床开采采用暂留隔离矿柱阶段空场嗣后充填采矿法,矿山生产规模设计为10000t/d.

1.1 地表模型的构建

以矿山地形图为原始资料,按以下步骤完成 地表模型的构建:1)在 CAD 中提取等高线及相应 的标高值,保存为新文件;2)将等高线按其标高 置于不同的图层中,图层名为图层中等高线按其标高 置于不同的图层中,图层名为图层中等高线标高为 800 m;3)将所有图层按标高值进行拔高,形成三 维等高线,保存为 dxf 格式文件;4)在 Datamine 中 将 dxf 格式文件转换成软件支持的线文件;5)清 理线文件中的重复点、跨接和聚结点;6)闭合所 有等高线,并按标高对线串进行统一编号;7)利 用线文件生成 DTM,完成地表模型的构建.

1.2 岩层线框模型的构建

分别将勘探线剖面上表示岩层层位面的分界 线两两相连,生成某一岩层的上下2个表面,然 后,将同一表面层位线的外轮廓连起,并将表示相 邻两岩层表面的轮廓线相连,形成一个"围墙", 两者合并后,形成某一层岩体,即三维岩层线框模 型,如图1所示^[2].



图 1 三维岩层线框模型 Fig. 1 Three – dimensional terrene wireframe model

1.3 矿体线框模型的构建

提取每个勘探线剖面上矿体边界线,并将其 相连形成矿体线框模型和难易选矿石分界面模 型.回采顺序数值模拟要求反映每个采场的空间 位置和大小,为此,进一步建立首采地段的采场线 框模型.依据各采场设计剖面图及矿体顶板边界 线建立的各盘区采场线框模型如图2所示,从左 至右依次为第四、第一、第二、第三盘区,盘区之间 为隔离矿柱.



图 2 首采区段各盘区采场线框模型 Fig. 2 Stope model in first mine

1.4 块段模型的构建

建立块段模型的步骤为:1)确定块段模型范 围.包括数值模拟分析中的所有采场、岩层和地 表;2)定义单元大小.根据数值模拟分析精度的 需要、采场设计尺寸,取单元块尺寸为3m×3m ×6m;3)根据确定的参数建立空块段模型;4)分 別用地表模型,岩层模型、矿体模型、难易选矿石 分界面模型及采场模型对块段模型进行约束,并 对其中的单元块赋相应的属性;5)用矿体约束后 得到的模型,根据已知钻孔组合样和已经得到的 理论变异函数参数,采用普通克立格法对单元块 铜元素品位进行推估;6)将前两步建立的模型依 次相加,生成最终的模型^[8].

2 数值计算模型

2.1 Datamine 与 FLAC^{3D}耦合建模

纵观国内外相关文献^[10-12],笔者认为将 Datamine 与 Flac^{3D}结合构建数值分析模型可以采用 数据转换和软件二次开发两种方式进行.数据转 换只要弄清 Datamine 与 Flac^{3D}的有关数据文件格 式就可以实现.而软件二次开发则需要改写 Datamine 源程序,而通常用户又无法掌握该软件的 源程序,即使有源程序,实现起来也非常困难.因 此,采用数据转换方式将块段模型的单元块信息 按 Flac^{3D} 网格模型要求的格式,通过编制数据转 换程序将两者耦合,形成 Flac^{3D}分析的前处理模 型^[12].模型包含首采区拟回采的四个盘区,尽寸 为 450 m × 450 m × 70 m,该模型共有 642785 个 单元和 673920 个节点.图 3 为 FLAC^{3D}计算模型, 图 4 为数值模型的矿房、矿柱采场图.



图 3 FLAC^{3D}计算模型 Fig. 3 FLAC^{3D} computing model



图 4 数值模型的矿房、矿柱采场图 Fig. 4 Room and pillar numerical model

2.2 本构模型

构造模拟空区围岩的数值模型需定义岩体性质的数学模型,即本构模型.对冬瓜山铜矿来说,

由于计算研究范围涉及的岩体、矿体、尾胶充填体 均属弹塑性材料,适应于莫尔—库仑破坏准则.其 力学模型为.

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} \quad (1)$$

式中, σ_1 、 σ_3 分别是最大和最小主应力,C、 σ 分别 是材料内聚力和内摩擦角.f,是破坏判断系数.当 f, ≥ 0 时,材料处于塑性流动状态;当f, ≤ 0 时,材 料处于弹性变形阶段.在拉应力状态下,如果拉应 力超过材料的抗拉强度,材料将发生拉伸破坏.

2.3 岩体物理力学参数

计算中的岩体有栖霞组大理岩、黄龙组大理 岩、蛇纹石、石英闪长岩、含铜磁黄铁矿 5 种及尾 胶和尾砂 2 种充填体,其强度参数是对冬瓜山岩 石力学参数折减而得.参照国内外专家提出的各 种岩体强度参数的折减方法^[13],内摩擦角 φ 按 0.85 折减,内聚力按 1/7 ~ 1/10 折减,弹性模量 按 2/3 折减,全尾胶充填体弹模取 1 GPa,全尾砂 弹模取 0.5 GPa.得到岩体物理力学参数见表 1.

2.4 初始应力场和边界条件

初始应力场:由于模型矿体处于缓倾斜状态, 在-730 m水平上下,因此,初始应力场选择以 -730 m地应力量测点实验测定结果的应力值. σ₂ 近似为垂直应力,且在深部矿体大致等于上复 岩体的自重应力;最大主应力方向与矿体走向大 体一致,为 NE - SW 方向,近似水平.本次数值模 拟计算采用表 2 原始地应力量测及实验测定参 数,以测点 2 数值为主.

边界条件:采用位移约束的边界条件,即模型的左右(X方向)边界、前后(Y方向)边界和底边界均施加位移约束条件,上边界(Z方向)为自由边界.对边界应力,取该处相对应的地应力进行约束.

3 模拟方案及结果分析

3.1 回采顺序模拟方案

由于冬瓜山矿岩具有岩爆倾向,为起到对地 压的控制作用,在垂直矿体走向方向上,矿床总体 回采顺序由背斜轴部向两翼推进;沿矿体走向上, 盘区回采顺序由中央厚大部位向两端推进.首采 地段四个盘区共有 83 个采场,盘区中间矿体厚 大.为满足日产万吨的生产能力,要求至少4 个采 场同时回采.综合考虑以上各因素,并结合冬瓜山 采场分布状况,确定回采顺序模拟方案的原则^[14] 是:1)分别考虑盘区间隔同时回采和相邻盘区同 时回采两种方案.2)满足生产能力的要求.考虑 不均衡系数,按6个采场组织回采,保证日产万吨 持续稳定的生产能力.为提高设备利用率,保持均 衡生产,兼顾深孔采场和中深孔采场的搭配,每步 开挖同时布置4个深孔采场和2个中深孔采场. 3)兼顾全尾砂胶结和全尾砂充填方式的搭配.每 步开挖一般有 2 个以上采场采用全尾砂胶结或全 尾砂充填.4)为控制地压和创造好的生产条件, 先开挖的深孔采场按"隔 3 采 1"方式布置在矿体 厚大部位.

介质	容重 /(g・cm ⁻³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 / MPa	内聚力 /MPa	摩擦角 /(°)
黄龙组大理岩	2.7	8.32	3.12	0.33	1.7	1.60	33.5
栖霞大理岩	2.71	10.2	5.92	0.26	2.24	1.71	45.02
含铜蛇纹石	3.3	6.28	4.24	0.22	2.10	2.32	49.64
石英闪长岩	2.72	21.27	11.89	0.26	2.78	2.75	45.90
矿体	3.97	23.18	14.20	0.25	3.04	3.69	47.70
尾胶充填体	2.0	0.67	0.36	0.25	0.50	0.40	36
尾砂充填体	1.9	0.181	0.24	0.04	0.4	0.24	26

表 1 岩体物理力学参数 Table 1 Mechanical parameters of rock mass

表 2 - 730m 水平原岩应力实测结果 Table 2 Initialize stress in - 730m level

劉王	主应力/MPa								
侧悬	σ_1	σ_2	σ_3	α_{i}	α_2	α_3	β_1	β_2	β_3
1	32.75	12.23	8.69	2.25	25.81	64.08	48.31	317.22	142.95
2	34.33	16.47	13.84	6.37	44.39	44.9	248.42	152.13	344.81

根据上述模拟方案确定原则,设计以下两种 可行的回采顺序模拟方案.

方案一:1^{*}、2^{*}相邻盘区同时先行回采,然后 分别转到4^{*}、3^{*}盘区回采,兼顾深孔和中深孔采 场、全尾胶和全尾砂充填方式的搭配;1^{*}、2^{*}每个 盘区尾胶充填采场先按"隔3采1"方式分别布置 2个深孔采场,在两个盘区再分别布置1个中深 孔采场,每个盘区3个采场;回采区域共4个盘区 每步6个采场同时回采出矿,按分步开挖嗣后充 填的回采顺序进行回采模拟计算.

方案二:1^{*}、3^{*}盘区间隔同时先采,然后分别 转到4^{*}、2^{*}盘区间隔回采;1^{*}、3^{*}盘区先各自按"隔 3采1"方式布置2个深孔采场,在两个盘区再分 别布置1个中深孔采场,兼顾深孔和中深孔采场、 全尾胶和全尾砂充填方式的搭配,每个盘区3个 采场;回采区域共4个盘区每步开挖6个采场同 时回采出矿.按分步开挖嗣后充填的回采顺序进 行模拟计算.方案二回采顺序,如图5所示.

3.2 结果分析

为了反映首采地段回采后矿房、矿柱、隔离矿

柱应力、位移、塑性区的分布状况,在采场中间垂 直矿体走向,选择51、53、55和57线剖面,在隔离 矿柱中心线选择52、54、56线剖面,在沿矿体走向 方向,在矿体厚大部位选择A-A剖面,分别获得 开挖14步后,各剖面的最大主应力、最小主应力、 垂直位移、水平位移、塑性区等分布情况,统计上 述参数计算结果的最大值(见表3),从表3可以 看出,只有56线隔离矿柱的最大塑性区面积方案 一比方案二小,其它指标方案二均优于方案一,显 然,方案二回采顺序较优.

选取盘区 53 线、55 线剖面,分别对应力分 布、位移分布及塑性区大小进行对比分析,如图 6、图 7 和图 8 所示.

以上两个方案位移、最大主应力、塑性区最大 值的对比图表明,盘区间隔回采有利于避免回采 过程应力过于集中、产生较大的位移和塑性区,有 利于回采区域在开挖过程中的结构稳定,采用回 采区域盘区间隔回采的方案二回采顺序较优.因 此,选择方案二为冬瓜山矿最终回采顺序.



注:图中采场左边数字代表采场号,右边数字表示开挖顺序,灰色表示尾砂充填,双号为矿房,单号为矿柱. 图 5 方案二回采顺序图

Fig. 5 The mining order of the second scheme

·····		······································					
刘西冶墨	方案	最大主应力	最小主应力	最大拉应力	最大水平	最大垂直	塑性区
司即位皇		/MPa	/MPa	∕MPa	位移/cm	位移/cm	$/m^2$
51 (4)		60.36	16.67	2.23	9.26	20.39	1 206
51 线		59.94	16.57	1.43	9.01	20.36	846
53 伊		67.85	16.84	1.02	5.58	25.61	2 016
55 <u>5</u> %		66.70	16.80	1.18	5.57	25.48	1 530
ee La		66.71	16.83	1.76	7.93	24.91	3 420
55 线		65.01	17.45	1.08	7.30	25.05	2 214
57 44		46.81	16.85	1.46	8.90	18.20	1 890
57线		56.37	16.89	1.48	9.02	17.68	1 530
50 绊腐肉矿壮		71.31	22.06	1.28	4.41	20.02	2 052
52 线隔离单性		72.45	21.44	1.54	4.06	19.85	2 034
54 光暝页矿壮		84.71	21.41	0.20	6.76	21.82	6 516
54 线椭离步 任		85.29	21.73	1.22	6.48	21.85	5 292
56 纰暝卤矿壮		85.82	21.22	1.14	9.44	17.93	4 248
50 线照商9 性	_	84.20	20.01	1.14	9.20	17.93	4 860
		82.71	21.93	1.44	8.67	25.61	1 980
A-A 司面		84.57	20.24	1.47	7.77	25.48	1 656

	表 3	两方案不同位置应力、位移、塑性区最大值比较表
Table 3	The most s	tress, displacement and plastic zone contrast between two schemes









图 8 方案一和方案二各步塑性区面积最大值对比图 Fig. 8 The most plastic zone contrast between two schemes

4 结论

1)针对数值模拟软件 Flac³⁰前处理复杂、困 难的弱点、采用矿业软件 Datamine 准确建立了冬 瓜山铜矿地表、岩层、矿体及块段模型,并通过编 程将其转化为 Flac^{3D}数值计算模型,从而简化了 数值软件前处理,提高了模拟计算精度;

2)根据冬瓜山深井缓倾斜矿体复杂的开采

技术条件,选取两种典型回采方案进行回采过程 模拟,分别对比分析了两种方案回采过程中的应 力、位移及塑性区分布规律,优选方案二为矿山最 终回采顺序。

参考文献:

- [1] 施建俊,孟海利.采场结构参数与回采顺序的数值模 拟优化研究[J].有色金属(矿山部分),2005,57(2): 9-12.
- [2] 杨承祥. 深井金属矿床高效开采及地压监控技术研 究[D]. 长沙:中南大学,2007.
- [3] 曹 明, 吕广忠, 王志国. 金厂峪地下采场回采顺序弹 塑性数值模拟分析[J]. 金属矿山, 2004(12):23-26.
- [4] 杨典森,陈卫忠,杨为民,等. 龙滩地下洞室群围岩稳 定性分析[J]. 岩土力学,2004,259(3):391-395.
- [5] LUO Zhouquan, LIU Xiaoming, SU Jiahong, et al. Deposit
 3D modeling and application [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14 (2): 225 229.
- [6] Gong Jian ya, Cheng Peng gen, Wang Dong yang. Three dimensional modeling and application in geological exploration engineering [J]. Computers&Geosciences, 2004,30(4):391-404.
- [7] Houlding S W. Practical geostatistics, modeling and spa-

tial analysis[M]. New York and Heidelburg: Springer - Verlag, 2000.

- [8] 罗周全,刘晓明,吴亚斌,等.地质统计学在多金属矿 床储量计算中的应用研究[J].地质与勘探,2007,43
 (3):83-87.
- [9] Lemon A M, Jones N L. Building solid models from boreholes and user – defined cross – sections [J]. Computers &Geosciences, 2003, 29(3):547 – 555.
- [10]罗周全,刘晓明,吴亚斌,等.基于 Surpac 和 Phase ~
 2 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.
- [11] 王纯祥,白世伟.三维地层信息系统与有限元方法 集成研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21): 3695-3699.
- [12] 罗周全,吴亚斌,刘晓明,等. 基于 Surpac 的复杂地 质体 FLAC³⁰模型生成技术[J]. 岩土力学,2008,29 (5):1334-1338.
- [13] Hoek, Brown E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength [J]. International Journal of Rock Mechanics of Mining Science, 1997, 34(8):1165-1186.
- [14]朱维申,李晓静,郭彦双,等.地下大型洞室群稳定
 性的系统性研究[J].岩石力学与工程学报,2004, 23(10):1689-1693.

(上接第9页)

从实验结果可以看出,当采用标准分、隶属度 阀值为0.5时,异常成绩检测方法表现出了优异 的性能,查全率达到0.75,查准率达到0.71,综合 评价函数 F 为0.73 达到最高分.

4 小结

本文将教育学原理与数据清洗技术相结合, 提出了一种基于分布特征的异常成绩检测方法. 在理论上论证了方法的合理性,并通过实验验证 了方法的有效性.本文的工作不仅对于提高成绩 管理系统的运行质量有直接的作用,而且为将数 据质量研究应用于教育信息化领域提供了很好的 开端.我们下一步的工作包括两个方面:一是进一 步改进异常成绩检测方法,并将它集成到教务管 理信息系统中;而是探索数据质量评估与提高技 术在教育信息化中的其它应用.

参考文献:

- [1] 韩京宇,徐立臻,董逸生.数据质量研究综述[J]. 计 算机科学,2008,35(2):1-5.
- [2] Kahn B, Strong D, Wang R Y. Information Quality Benchmarks: Product and Service Performance [J].
 Communications of the ACM, 2002, 45(4):184 - 192.
- [3] Richard Y Wang, Diane M Strong. Beyond accuracy: What data quality means to data consumers [J]. Journal of Management Information System, 1996, 12(4):5 -34.
- [4] Hipp J, Guntzer U, Grimmer U. Data quality mining: making a virtue of necessity [C]//Workshop on Research Issues in Data Mining and Knowledge Discovery, Santa Barbara:2001,52-57.
- [5] 黄光扬. 教育测量与评价[M]. 上海: 华东师范大学 出版社, 2002.