

文章编号:1000-582x(2001)05-0062-05

南桐煤矿开采岩移规律的数值模拟^{*}

尹光志^{1,2},代高飞^{1,2},万玲¹,张东明^{1,2}

(1.重庆大学资源及环境科学学院,重庆 400044;

2.重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对南桐矿务局南桐煤矿深部开采复杂的采矿地质条件,运用求解非线性大变形问题有限差分法(FLAC),对南桐煤矿二井三区开采引起的岩体移动、矿山压力分布和地表沉陷进行了研究,总结出了南桐煤矿深部开采引起的岩体移动的基本特征,采场周围矿山压力分布规律和地表沉陷的相关参数,所得结果对现场开采、工作面支护和采空区处理具有一定的指导作用,对开采所致的地表沉陷的治理提供了科学的依据。

关键词:数值模拟;FLAC;岩体移动;地表沉陷

中图分类号:TD 32

文献标识码:A

由于开采地质条件的复杂性,煤层开采将引起岩层和地表连续的移动、变形和非连续破坏,特别是随着采深的逐渐增加,开采沉陷问题越来越突出,对矿井安全生产带来了严重影响。作者针对南桐矿务局南桐煤矿二井三区深部开采的实际情况,运用FLAC程序对南桐煤矿开采岩移基本规律、矿山压力分布规律和地表移动变形规律进行了数值模拟研究,这对于南桐煤矿和具有相似条件矿井的“三下”采煤具有指导作用。

南桐煤矿二井三区主要产煤地层为上三叠系须家河组 and 上二叠系龙潭组,龙潭组的4、5及6号煤层为南桐煤矿的主采煤层,5号煤层较薄,4号和6号煤层较厚,平均厚度在1 m以上,部分地区可达到3 m,煤层倾角为35度左右,平均采深为500 m。二井三区采用走向长壁采煤法,采空区采用全部垮落法管理顶板。采区内地质构造较多,溶洞较发育,地下水丰富。节理、裂隙发育,断层多。南桐煤矿煤岩层力学参数如表1所示。

1 研究区域概况

表1 南桐煤矿岩石力学参数

岩石名称	弹性模量 (10^4 MPa)	泊松比 (μ)	内聚力 (MPa)	内摩擦角 ($^\circ$)	单轴抗压 强度(MPa)	单轴抗拉 强度(MPa)
石灰岩	12.056	0.273	14.51	33.4	70.270	3.218
泥质石灰岩	1.532	0.288	14.51	33.4	27.622	0.711
煤层	0.163	0.239	1.04	34.2	11.833	0.358
石灰岩	12.056	0.273	14.51	33.4	70.270	3.218

2 数值模拟研究

FLAC^[1]是Fast Lagrangian Analysis of Continua的缩写,可译为连续介质快速拉格朗日分析,它由美国ITASCA咨询集团于1986年研制推出。FLAC是一种

显式有限差分程序,它在数值计算格式中采用的是动态方程,其目的是确保当所模拟的物理系统不稳定时,数值计算仍然是稳定的,这便使FLAC程序特别适用于模拟岩土类非线性材料的几何大变形问题,因而它在各类岩土工程中都有可喜的应用。FLAC采用的是

* 收稿日期:2001-04-15

基金项目:教育部高等学校骨干教师和优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(2000年)

作者简介:尹光志(1962-),男,四川西昌人,博士、教授、博士生导师,主要从事采矿工程与岩石力学方面的教学和科研工作。

显式方法求解策略,不用求解繁杂的联立方程组,即其控制方程中的诸导出量都可以用由场变量构成的代数表达式来描述,且无须规定各个场变量在单元内的变化模式。

FLAC 分别提供了各向同性和宏观各向同性材料线弹性模型、Mohr - Coulomb 和 Ducker - Prager 模型、应变软化和双屈服模型以及修正的 Cam - clay 模型等等,此外,它本身自带的程序设计语言还可以用来构造新的模型^[3]。作者采用 FLAC 程序对深部开采的岩移规律、矿山压力分布规律和地表移动变形规律进行了数值分析。

2.1 有限差分格式

2.1.1 导数的表示

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \lim \left[\frac{1}{\Delta x_i} \int F n_i ds \right] \quad (1)$$

式中: F 为矢量或张量; x_i 为位置矢量分量; A 为积分区域; ds 为弧长增量; n_i 为垂直于 ds 的单位法线分量。

2.1.2 运动方程式

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} \right] = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; σ_{ij} 为应力张量; u_i 为速度; g_i 为体力分量; t 为时间。对于某一受随时间变化的力 F 作用的某质量体的运动方程式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{F}{m} \quad (3)$$

可以用包含半时间步长的速度的中心差分格式来求解。其加速度可以写为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{(t+\Delta t/2)} - u^{(t-\Delta t/2)}}{\Delta t} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式得:

$$u^{(t+\Delta t/2)} = u^{(t-\Delta t/2)} + [F^{(t)}/m] \Delta t \quad (5)$$

2.1.3 应变增量方程式

在增量形式中,应变张量为:

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \Delta t \quad (6)$$

式中 Δe_{ij} 为应变增量张量; u_i 为 i 向速度分量; x_i 为 i 向坐标分量; Δt 为时间步长。

2.1.4 计算循环^[3]

FLAC 的计算循环如图 1 所示:

根据南桐煤矿的开采地质条件,选取本次模拟的本构模型为符合莫尔 - 库仑准则的弹塑性材料模型。有限差分计算模型及其边界条件见图 2。主要几何参数依据开采地质条件和开采方案,考虑岩体移动范围而定,约束条件是左右边界水平约束;地表为自由边

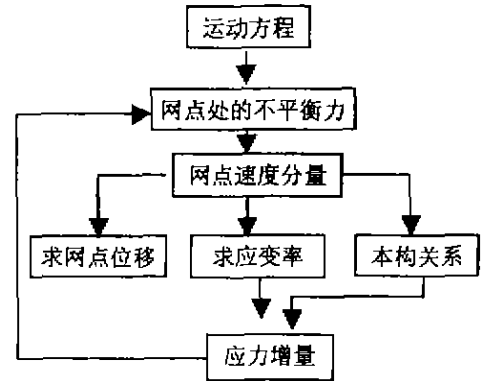


图 1 每个时步的计算循环

界;底面铅垂约束。模型模拟范围为:从地表起 500 m 的采深,沿煤层走向 120 m,沿煤层倾向 600 m。模拟范围内地表属山区地带。模型网格的划分在煤层,顶底板附近和地表较密集,其它地方较稀疏。模型采用等参四边形单元,共划分为 1600 个单元,1681 个结点。FLAC 计算所得的应力矢量见图 3。水平应力,铅垂应力和剪切应力等值线如图 4,图 5 和图 6;水平移动和下沉量等值线见图 7 和图 8;下沉移动速度等值线如图 9。

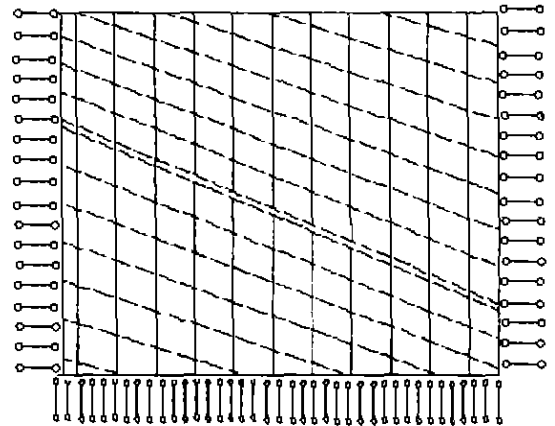


图 2 计算模型网格划分和边界条件

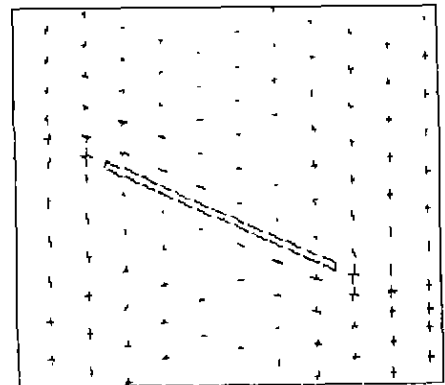


图 3 计算区域主应力矢量分布

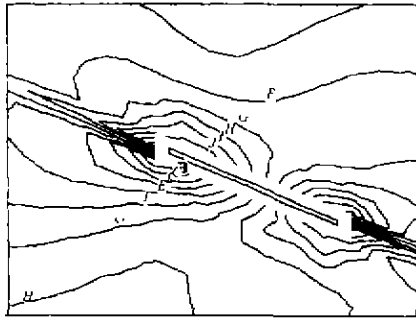


图4 计算区域水平应力分布等值线

3 计算结果分析

根据数值模拟结果可以看出,随着工作面的推进,顶板在上覆岩层载荷和自重作用下开始变形,块体产生向采空区方向的位移。在开采初期,工作面下部位移比上部大。随着开采的推进,直接顶在下部和上部岩体处开始被拉断,并向采空区方向有显著的位移。当采空区范围进一步扩大,顶板和上覆岩层的位移继续增加。这种趋势发展到地表后,就形成地表移动下沉盆地。移动盆地上山方向的影响范围比下山方向的影响范围小,上山部分的下沉曲线比下山部分的下沉曲线陡。最大下沉点位置向下山方向偏离。同时,指向上山方向的水平移动值逐渐增大,而指向下山方向的水平移动值逐渐减小。在中下部的直接顶基本接底,上部由于煤壁支撑而发生回转运动时,顶板局部由于下沉速度不等而出现离层。随着采空区范围的进一步扩大,顶板开始大面积冒落。直接顶冒落后,岩层运动波及到裂隙带岩层,使岩层出现了整体沉降,裂隙带岩层仍以节理与层面的剪切滑移为主要破坏形式。采空区基本冒落后,下部冒落矸石在上覆岩层压力作用下逐渐压实,岩块间的错动加大,冒落拱逐渐形成,且冒落高度仍在扩展,整个岩层系统仍处于运动之中。随着时间的推移,冒落拱和裂隙带逐渐形成,岩层趋于稳定。采空区下部被冒落矸石充填并被压实,冒落带中一些原已离层或彼此脱离力学联系的部分又被压实。从采空区向两侧煤体,底板应力逐渐增加。在工作面两侧煤体,随深度增加垂直应力急剧下降,到达一定距离后,下降梯度变缓。在工作面两侧煤体下方,垂直应力等值线呈倾向于煤体的“泡”形分布,如图5所示,在煤体两侧煤体下垂直应力等值线略有差异,下山方向的集中程度略高,影响范围略大。顶底板应力峰值并不对称,分别向上山和下山方向偏移。由于采空区减弱了重力场向煤层底板的传播,在工作面两侧形成了比原岩应力高得多的支承压力区,见图5。初次垮塌前后,采场上覆岩层以梁结构的形式作用在采空区上方。在直接顶的中部和上下煤

壁处均出现拉应力,如图5和图6,这是导致直接顶冒落破坏的主要原因。从主应力的方向看,最大主应力方向基本是环绕采空区的,如图3。采空区下部底板处于卸压状态,且卸压深度较大。而在两侧煤体的下部底板应力却是升高的^[4]。除了采场上覆岩层载荷通过力学结构传递外,还包括由于倾角而产生的切向载荷和采深加大的综合作用。由于上覆岩层的作用,造成冒落矸石又被重新压实,在压实过程中采空区冒落矸石中的应力也有局部升高,这是应力重新分布的结果,且压实处的集中应力在底板岩层中也有一定深度的传递,见图5、图6和图7。

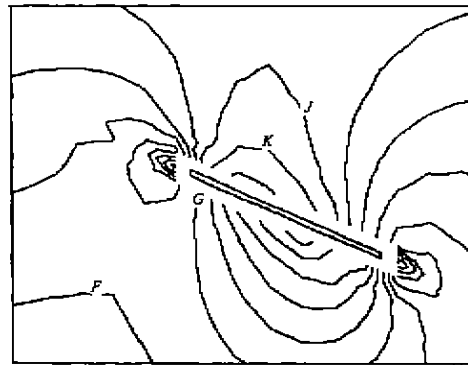


图5 计算区域垂直应力分布等值线

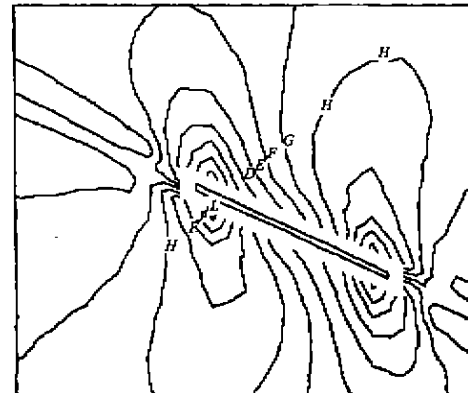


图6 计算区域剪切应力分布等值线

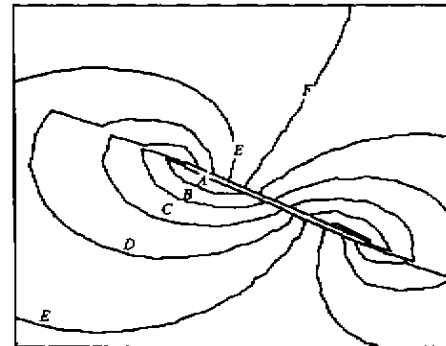


图7 计算区域水平移动量等值线

在围岩运动趋于稳定后,垂直应力的主要特征是在上下煤体附近应力高度集中,底板的最终卸压范围是半个椭圆形,其长轴与主节理方向一致,上侧煤体支撑压力峰值低于下侧煤体支撑压力峰值。随着采场上覆岩层的运动,采空区冒矸石的压实、围岩应力有所调整,最终趋于稳定的应力值。根据现场测试下沉速度曲线可将地表移动过程划分为初始阶段、活跃阶段和衰减阶段,并且这3个阶段是周期性往复出现的^[1]。在采空区未垮之前,底板点的应力值基本上是直接底岩层的自重,见图6和图7,但当直接顶冒落以后,在上覆岩层的载荷作用下,其应力急剧增加,局部超过原岩应力。随着围岩运动的稳定,上覆岩层力学结构趋于平衡,底板应力又逐渐减少,最终趋于稳定,且都低于原岩应力。从底板应力的分布可以看出,煤体下方的应力反映了作用在工作面两侧煤体之上的支撑压力的变化,而采空区下的底板应力则反映了冒落矸石及其上覆岩层的运动与变化。因此,底板应力也是揭示采场围岩运动规律的一个重要方面。

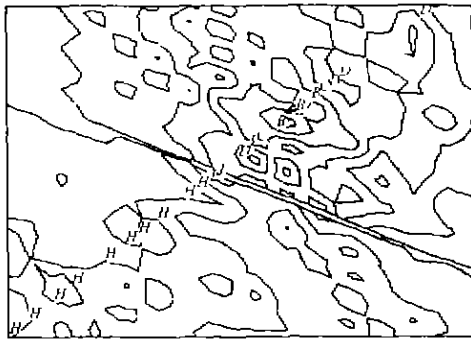


图8 计算区域下沉量等值线

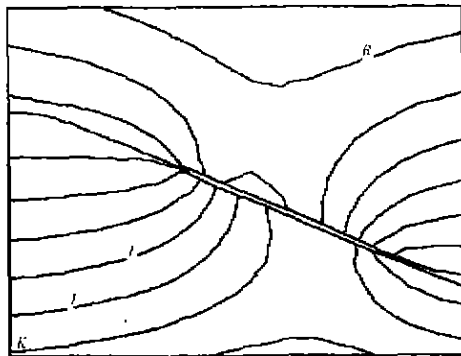


图9 计算区域下沉移动速度等值线

4 结 论

1) 南桐煤矿主要影响半径为 195 m; 拐点偏移距为 20 m; 边界角为 53°; 移动角为 58°; 开采影响传播角

为 69°; 冒落带高度为 37 m; 裂隙带高度为 84.2 m; 地表移动波及范围在采区上方大于 600 m。

2) 初移时移动盆地成近似半对称分布状态,随着工作面的推进,移动盆地的非对称性越来越明显。南桐煤矿的下沉曲线向下山方向偏移,当推进长度达到临界长度时,移动盆地的非对称性也趋向稳定。南桐煤矿水平移动最大值为 310 mm,是水平移动总量的 71%,南桐煤矿水平变形最大值为 0.2 mm/m。

3) 南桐煤矿上山方向的影响范围比下山方向的影响范围小,上山部分的下沉曲线比下山部分的下沉曲线陡。南桐煤矿煤层开采时,指向上山方向的水平移动值逐渐增大,而指向下山方向的水平移动值逐渐减小,最大拉伸变形在下山方向,最大压缩变形在上山方向。

4) 岩体移动过程可以分为初始阶段,活跃阶段(危险变形阶段)、衰减阶段,随着开采工作的进行,3个阶段将会循环出现。

通过对南桐煤矿二井三区的数值模拟研究,弄清了南桐煤矿深部开采的岩移基本规律、矿山压力分布规律和地表移动、变形的基本特征,为现场采掘工作提供了科学依据。此外,由于南桐煤矿的矿井涌水量较大,经常威胁正常生产,本文的部分成果对南桐煤矿顶板裂隙突水的预测和防治具有指导作用。

参考文献:

- [1] FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 2.0, User's Manual[S]. USA: Itasca Consulting, Inc., 1997.
- [2] 孙钧. 世纪之交的岩石力学研究[C]. 中国岩石力学与工程学会第五次学术大会论文集, 1998, 1-16.
- [3] 蒋宇静. 三峡永久船闸闸室及高陡边坡变形与应力分布的 FLAC-3D 数值分析研究报告[R]. 同济大学、九州大学合作研究论文, 1998.
- [4] 钟道昌. 采场覆岩破坏和运动规律的实验研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 1996, 3: 61-64.
- [5] 杨伦. 煤矿覆岩采动离层位置的计算[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 477-480.
- [6] 王金庄. 地表下沉盆地偏态形成的机理分析[J]. 煤炭学报, 1999, 24(3): 252-255.
- [7] 滕永海. 采动过程中覆岩离层发育规律的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 25-28.
- [8] 谢和平. FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397-401.
- [9] 康红普. 回采巷道锚杆支护影响因素的 FLAC 分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 534-537.

Numerical Simulation of Strata Movement Behavior in Deep Excavation

YIN Guang-zhi^{1,2}, DAI Gao-fei^{1,2}, WAN Ling¹, ZHANG Dong-ming^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: According to the complex conditions of deep excavation in Nantong mine, FLAC program are carried out for strata movement, ground pressure and surface displacement due to coal extraction. Based on the analysis of Nantong mine, the basic features of strata movement, the fundamental behavior of ground pressure and the related parameters of surface displacement are obtained. The results are of referential value for mining, supporting and preventing of surface displacement.

Key words: numerical simulation; FLAC, strata movement; surface displacement

(责任编辑 钟学恒)

~~~~~  
{上接第 61 页}

## Digit Weight and Development of a Virtual Noise Analyzer

*YANG Chang-qi<sup>1</sup>, QIN Shu-ren<sup>2</sup>, ZHANG Yue-jun<sup>1</sup>*

(1. College resource and environment science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Traditional noise octave analyzers consist of filter network and weight network based on hardware. In order to realize a noise octave analysis by software, a digit weight method based on FFT is proposed. Using the method, digit weight and digit system error modification for virtual noise octave analyzer can be realized. Because of digit weight and digit system error modification, precision and stability of the instrument can be improved greatly. As an application, which combines the method of digit weight with the technique of digit system error modification, a low cost and high precision virtual real-time noise octave analyzer is developed.

**Key words:** Noise measurement; Virtual instrument; Digit weight; FFT

(责任编辑 钟学恒)