

大倾角煤层开采岩移基本规律的研究

Basic behaviour of strata movement in seam with deep dip angle

尹光志, 鲜学福, 代高飞, 张东明

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 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大倾角煤层的复杂条件, 运用实验室相似模型试验和基于显式有限差分基础上的 FLAC 程序, 对南桐煤矿二井三区煤层开采引起的岩体移动、矿山压力分布和地表沉陷的基本规律进行了研究, 所得结果对现场开采具有一定的指导作用。

关键词: 相似模型试验; FLAC; 大倾角煤层; 岩体移动; 地表沉陷

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)04-0450-04

作者简介: 尹光志, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 现任重庆大学资源及环境科学学院院长, 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主任, 主要从事岩石力学与采矿工程领域的研究工作。

YIN Guang-zhi, XIAN Xue-fu, DAI Gao-fei, ZHANG Dong-ming

(College of Resource and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 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 seam with deep dip angle in Nantong coal mine, model test and calculation with FLAC program are carried out to predict strata movement, ground pressure and subsidence due to mining. The obtained results are of referential value for engineering practice.

Key words: modeling experiment; FLAC; deep dip angle seam; strata movement; subsidence due to mining

1 引 言*

煤层开采引起岩层和地表产生连续的移动、变形和非连续破坏问题由来已久, 但由于采矿地质条件的复杂性, 使得问题仍未得到圆满解决, 特别是随着采深的逐渐增加, 开采沉陷问题越来越突出^[1]。本文通过实验室相似模型试验与数值分析相结合的方法, 针对南桐矿务局南桐煤矿二井三区开采的实际情况, 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研究, 这对于指南桐煤矿的“三下”采煤具有重要意义。

2 实验室相似模型试验研究

2.1 研究区域概况

南桐煤矿二井三区主要产煤地层为上三叠系须家河组和上二叠系龙潭组, 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°左右, 平均采深为 500 m。二井三区采用走向长壁采煤法, 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。南桐煤矿岩石力学参数见表 1。

2.2 相似模型试验设计

根据南桐煤矿的开采地质条件, 运用相似理论进

行了大倾角煤层的岩体移动和开采沉陷的相似模型试验研究, 试验模型和边界条件如图 1 所示。模型试验要求模型与原型的岩层厚度、采深以及开采空间的几何尺寸均应满足几何比。一般来说, 模型几何比愈大, 其精度越高, 越能反映原型的实际情况, 但所需成本和时间也越多。实践证明, 只要材料性能合适, 在提高加工精度及砌筑工艺水平, 采取较高精度的量测设备等技术措施的基础上, 适当缩小模型的几何比是可行的。由于本试验采取较好的模拟技术措施, 故选取模型几何比为 1:400。在选取的相似材料确定后, 其容重相似比就已确定。在相似材料模拟试验中, 相似材料的选择是非常重要的一个环节, 它决定着模拟真实岩体的精确性以及模型上模拟原形重要特征的可能性和全部试验的实用性, 因此模型材料应具备非常严格的条件。目前国内外通常使用的模型试验相似材料有石膏混合料、水泥浮石混合料、合成树脂材料、橡胶材料以及其它混合料。本试验选取以河砂为骨料, 石膏和石灰为胶结物的石膏混合物为相似材料。相似材料的容重比为 $C_\gamma = \gamma_H^1 / \gamma_M^1 = \gamma_H^2 / \gamma_M^2 = \dots = 1.667 = idem$, 式中原型用下标 H 表示, 模型用下标 M 表示, 上标数字表示岩层编号。据相似关系可求得模型的边界应力

* 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

收稿日期: 2000-12-11

比和强度比为 $C_\sigma = C_E = C_S = C_l C_r = 666.7$ 。根据蠕变试验曲线, 岩石受力后产生弹性应变, 则模型中应包含弹性元件; 应变随时间有增大的趋势, 则模型中应包含粘性元件; 应力降为零时, 应变有部分恢复, 这一特征与开尔文模型类似; 且在时间无限延长时, 应变将趋于某一定值, 这与广义开尔文体的特征相似。综上所述, 本次试验采用 HK 体模型较为合适, 其组合方式如图 2 所示。受试验条件限制, 以模型在重力作用下的运动学相似求取开挖模拟的时间比为 $C_t = \sqrt{C_l} = 20$ 。试验在规格(长×宽×高)为 $1.5\text{ m} \times 0.3\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 的平面应力转体模型试验台上进行^[2]。

表 1 南桐煤矿岩石力学参数

Table 1 The mechanical parameters of rock in Nantong coal mine

岩石名称	弹性模量/ 10^4 MPa	泊松比	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	单轴抗压强度/ MPa	单轴抗拉强度/ MPa
老顶	12.056	0.273	14.51	33.4	70.270	3.218
直接顶	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
底板	12.056	0.273	14.51	33.4	70.270	3.218

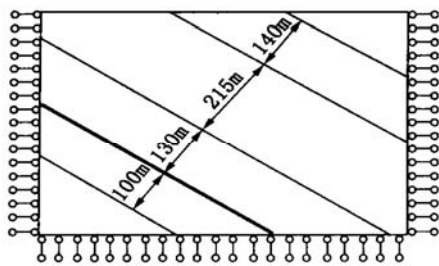


图 1 南桐煤矿计算试验模型和边界条件示意图

Fig. 1 Calculating and testing model of Nantong coal mine and its boundary condition

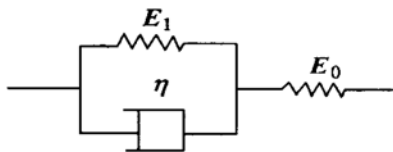


图 2 理论模型

Fig. 2 Theoretical model

根据试验条件和重庆地区的气候特点, 本试验采用湿法模型。根据相似材料配比表将各材料称好, 拌匀, 分层装入模型架内。层间加入云母粉作为自然层理。在模型干燥 7 d 后, 拆除两边挡板, 开始试验。模拟开采 4 号、6 号层, 累计开采厚度为 4 m 左右。在本试验中需进行量测的有地表下沉量、地表水平移动量、围岩位移、垮塌高度、离层高度。地表下沉量和水平移动量采用千分表量测, 测点在地表波及范围内布置较密集; 围岩位移采用 Ni-4 型 I 级水准仪测量, 位移测点在采场边界布置较密集, 远离采场边界的测点布置

较稀疏。根据作业规程, 采场的工作面推进速度为 2.4 m/d , 开采模拟过程为每隔 1.7 h 模拟开采一次, 每次模拟开采步距为 2.4 m , 每模拟开采一次后就对地表下沉量、水平移动量和采场上覆岩层位移进行观测, 记录测试结果和模拟过程中所发生的现象。

2.3 相似模型试验结果分析

相似模型试验中裂隙分布情况见表 2; 岩体移动及“三带”分布情况见图 3; 地表移动及变形曲线如图 4; 地表下沉和水平移动动态曲线如图 5。

表 2 南桐煤矿相似模型试验上覆岩层离层情况

Table 2 The parameters of rock cracks in model test of Nantong coal mine

裂隙序号	裂隙参数		
	长/cm	宽/cm	距煤层的距离/cm
1	46.0	0.5	0.9
2	53.2	5.1	5.7
3	47.3	0.2	9.3
4	46.2	0.2	10.7
5	43.2	0.1	19.1
6	68.1	0.1	21.1

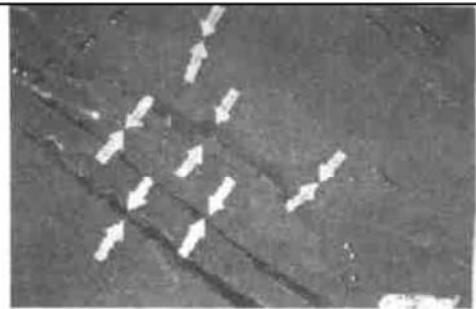


图 3 岩体移动及“三带”分布示意图

Fig. 3 Strata movement and distribution of “Three Belts”

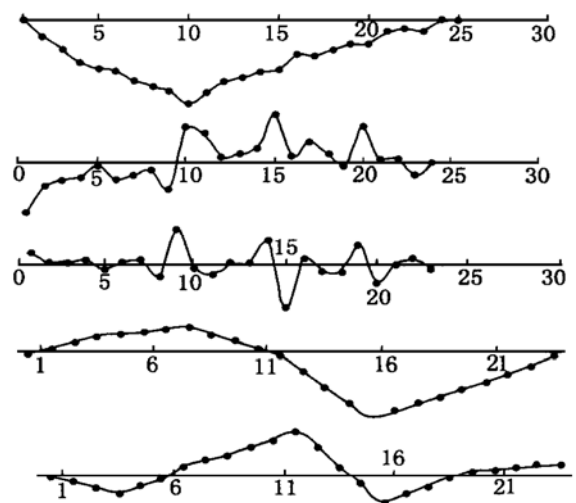


图 4 地表下沉及变形曲线图

Fig. 4 Subsidence and deformation curves

根据试验可以得出:

a) 南桐煤矿下沉系数 $q = 0.7$; 水平移动系数 b

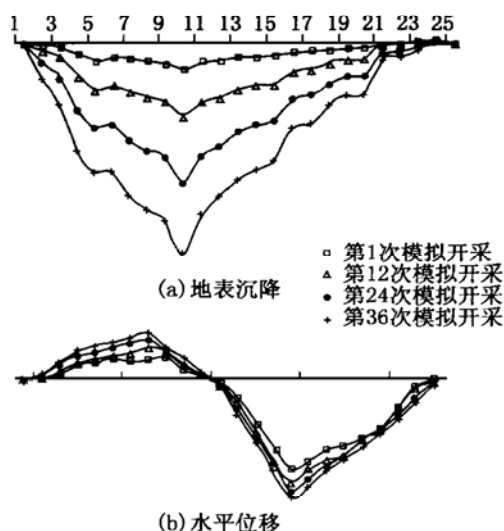


图5 南桐煤矿地表下沉和水平移动动态曲线

Fig. 5 The dynamic curves of surface subsidence and horizontal displacement

= 1.22; 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 37.0 m, 与现场测得冒落带最大高度值 30.7 m 接近; 裂隙带高度为 $84.2 \text{ m}^{[3]}$; 地表移动波及范围在采区上方大于 600 m。

b) 最大下沉点位置在 10 号测点附近; 最大倾斜点位置在 15 号测点附近; 最大曲率点位置在 15 号测点附近。最大水平移动点位置在 16 号测点附近; 最大水平变形点位置在 12 号测点附近。相似模型试验测得的最大值点位置与现场情况吻合。

c) 从动态曲线可以看出, 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^[4]。从移动和变形曲线可以看出, 随着工作面的推进, 各种曲线的规律性逐渐显现, 且水平移动和变形曲线的规律性较强。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。

d) 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。南桐煤矿最大拉伸变形在下山方向, 最大压缩变形在上山方向, 水平变形为零的点与最大水平移动点重合。南桐煤矿水平移动曲线和倾斜曲线不相似, 水平变形曲线和曲率曲线不相似。

e) 地表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, 如图 6 所示。由于相似模

型观测的时间比较长, 观测比较充分, 所以随着观测的继续进行, 三个阶段将会周期性的循环出现。

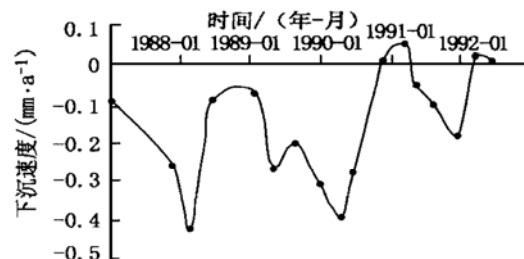


图6 地表下沉速度曲线

Fig. 6 The velocity of surface subsidence

f) 根据“三下”采煤规程计算导水裂隙带高度为 $H = 100Mh / (4.1h + 133)$ 。式中 M 为累计采厚, h 为阶段垂高, M 和 h 的单位均为 m。所以 $H = 100 \times 4 \times 98 / (4.1 \times 98 + 133) = 73.3 \text{ m}$ 。则导水裂隙带高度与累计采厚的比值为 18.3, 冒落带高度为导水裂隙带高度的 50.5%, 与现场测试结果较吻合^[5]。

3 数值分析研究

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 程序是为岩土力学和工程应用开发的计算软件, 计算程序中包括了反映地质材料力学效应的特殊计算功能, 非常适合解算岩土力学和岩土工程问题。本文采用 FLAC 程序对深部开采的岩移基本规律进行数值分析。

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。南桐煤矿的有限差分计算模型见图 1, 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, 铅垂自由, 地表为自由边界, 底面铅垂约束, 水平自由^[6,7]。模型采用等参四边形单元, 共化分为 1600 个单元, 1681 个结点。FLAC 计算所得的下沉量和水平移动等值线见图 7; 铅垂应力, 水平应力和剪切应力等值线如图 8 所示; 地表点, 顶板点和底板点下沉量随时间步长的变化曲线如图 9。

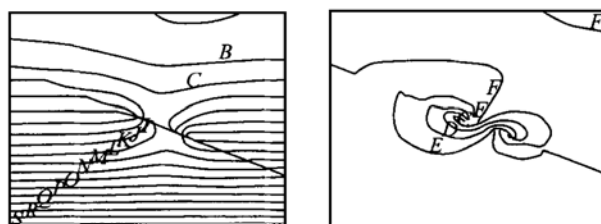


图7 南桐煤矿开采后下沉量和水平移动等值线图

Fig. 7 The contour of subsidence and horizontal displacement after mining in Nantong coal mine

根据数值分析结果可以得出:

a) 地表移动下沉盆地影响范围比下山

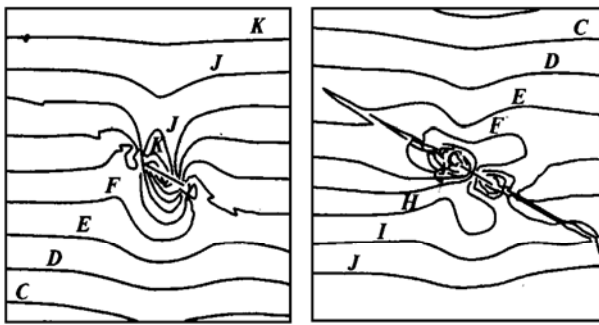


图8 南桐煤矿开采后铅垂应力和水平应力等值线图

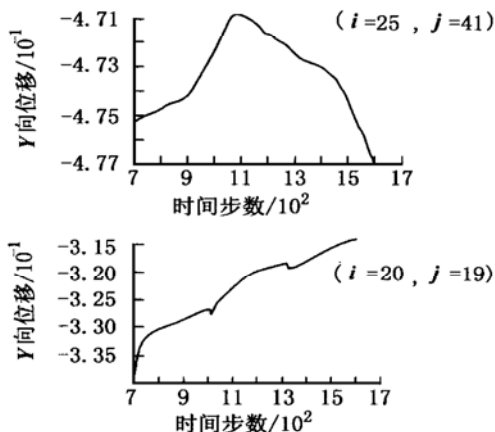
Fig. 8 The y -stress contour after mining in Nantong coal mine

图9 南桐煤矿地表点和顶板点的下沉量曲线

Fig. 9 The subsidence curves of surface and overlying strata in Nantong coal mine

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。下沉曲线的两个拐点与采空区不对称,而偏向下山方向。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。

b) 在整个岩层系统运动过程中,冒落拱和裂隙带逐渐形成,岩层趋于稳定。冒落带中一些原已离层或彼此脱离力学联系的部分被压实。冒落带最高处在距下端煤壁 30 m 处,冒高为 35.0 m;上部接近煤壁处冒高为 25.0 m,分布为上大下小,裂隙带波及范围较大。这一结果与模型试验吻合较好。

c) 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,在煤体下方出现应力集中。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。在直接顶的中部和上下煤壁处均出现拉应力,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 9 所示)。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,这是作用在煤体上的支撑压力向底板传递的结果。就应力大小而言,下侧煤体和岩体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。

d) 根据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,并且这三个阶段是周期性往复出现的^[8],如图 10 所示。这一点与相似模型结果十分接近。

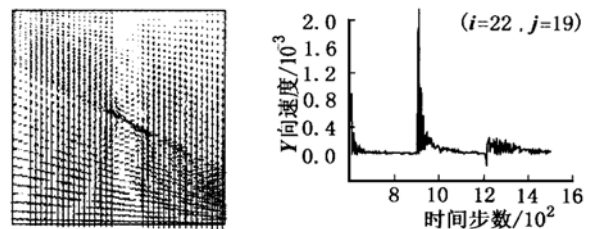


图10 模型主应力矢量图和下沉速度曲线

Fig. 10 Principal stress vector of model and curve of subsidence velocity

4 结 语

通过对南桐煤矿二井三区的相似模型试验与数值分析研究,弄清了大倾角煤层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] 姜 岩,等.覆岩注浆开采地表减沉过程分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 1: 23~ 25.
- [2] 钟道昌,等.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.
- [3] 杨 伦,等.煤矿覆岩采动离层位置的计算[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 477~ 480.
- [4] 王金庄,等.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.
- [5] 滕永海,等.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.
- [6] 谢和平,等. 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.
- [7] 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.
- [8] 金立平.冲击地压的发生条件及预测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学资环学院, 1992.