

FLAC在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析

谢和平¹ 周宏伟¹ 王金安¹ 李隆忠² M. A. Kwasniewski³

(¹中国矿业大学(北京校区)岩石力学与分形研究所 北京 100083) (²鹤壁矿务局 鹤壁 456600) (³西里西亚工业大学 波兰)

摘要 应用FLAC^{2D}3.3和FLAC^{3D}1.0对河南省鹤壁矿务局4矿开采沉陷进行了预计,通过对比分析经典预计方法(概率积分法)与FLAC计算结果,发现FLAC能真实地模拟现场地质条件,弥补一般经典方法不能考虑断层影响的不足,是一种简单易行的开采沉陷预计方法。

关键词 FLAC, 开采沉陷, 开采沉陷预计, 数值模拟

分类号 TD325.2

1 前言

目前我国建筑物下压煤特别是村庄下压煤量呈上升趋势^[1],煤层开采前对开采沉陷作出预计对保护地面建筑物和地面环境具有十分重要的意义。我国对开采沉陷学的研究经过最近几十年的发展已逐步成熟,形成了独立的学科范围和独特的研究方法,有关开采沉陷的理论和方法也已经在现场生产实践中发挥了重要作用。尤为值得一提的是,60年代我国学者引入波兰学者提出的开采沉陷的随机介质理论,并加以改进和完善,提出了地表移动预计的概率积分法,该方法直到目前仍被我国采矿行业广泛应用^[2,3]。

现有的开采沉陷理论基本上都是以均匀连续介质假设作为理论研究前提,不能考虑岩层中存在的非连续面,如节理、裂隙以及断层的影响。而实际上岩层中存在大量的节理裂隙和规模不等的断层,这些非连续面的存在影响了开采沉陷规律,尤其是当开采区域断层比较发育时,断层对开采沉陷规律的影响十分明显,在这种情况下就不得不考虑断层等非连续面的影响。另一方面,由于目前的开采沉陷预计理论(如概率积分法)的关键参数必须经过现场观测才能确定,因而给实际预测工作造成了一定的难度。鉴于此,本文用FLAC对煤矿开采沉陷进行了预计,该方法以岩石力学理论为基础,以煤岩物理力学参数和地层构造特性为计算依据,无需作任何假设

或确定某些关键参数,从而克服了经典预计方法的不足。本文针对河南省鹤壁矿务局4矿的具体条件,分别用两种不同的方法(即概率积分法和数值模拟方法)对开采沉陷进行了预计。

2 计算模型和计算参数

2.1 FLAC简介

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)是由美国Itasca公司开发的显式有限差分程序,能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为,分析渐进破坏和失稳,特别适用于模拟大变形。FLAC设有多种本构模型,另外,程序还设有界面单元,可以模拟断层、节理和摩擦边界的滑动、张开和闭合行为。支护结构如砌衬、锚杆、支架等与围岩的相互作用也可以在FLAC中进行模拟。FLAC采用显式算法来获得模型全部运动方程的时间步长解,从而可以追踪材料的渐进破坏和垮落,这对研究开采的时间效应和空间效应是非常重要的。此外,程序允许输入多种材料类型,亦可在计算过程中改变某个局部的材料参数,增强了程序使用的灵活性,用来提供采动区域的垮落过程和开采中的充填过程。FLAC具有强大的后处理功能,用户可以直接在屏幕上绘制或以文件形式创建和输出打印多种形式的图形。使用者还可根据需要,将若干个变量合并在一幅图形中进行研究分析。

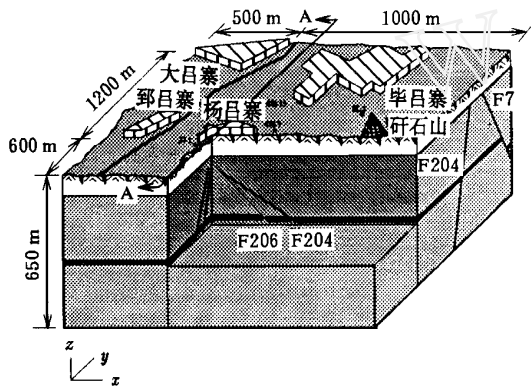
1998年2月27日收到初稿,1998年4月21日收到修改稿。

作者 谢和平 简介:男,43岁,博士,1987年毕业于中国矿业大学北京研究生部工程力学专业,现任博士生导师、中国矿业大学校长,主要从事分形几何、岩石力学、岩石类材料损伤断裂力学及其在采矿工程中的应用等教学与研究工作。

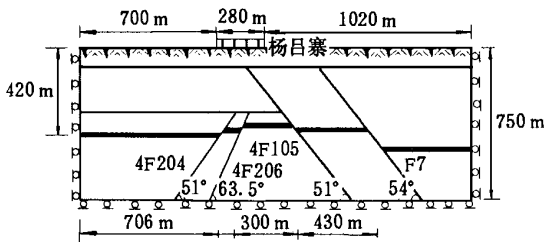
2.2 地质背景及数值计算模型

鹤壁矿务局 4 矿的主要可采煤层倾角为 0°~30°，平均埋深 420 m，煤层平均厚度 8.18 m，为高沼气煤层。顶底板岩石主要为砂岩、泥岩、灰岩、页岩等，表土层厚度 101.5 m。本文以 4 矿 6 采区作为研究对象，研究区域地质构造主要受 4 条断层控制(图 1(a))，这些断层皆为压断层，断层张开距很小，仅为几个厘米，充填物的厚度也很小。断层倾角 50°~65°。4F204 断层和 4F206 断层落差皆为 10 m，4F105 断层落差为 13 m，F7 断层落差为 100 m。本文选择了含断层的区域作为研究对象，并建立了三维立体模型(图 1(a))和二维平面模型(图 1(b))。

三维模型和二维模型都是采用分区组合的方法进行构造，首先按断层、层面和模型外边界进行分区，分别划分每个区的网格，然后再将各分区组合并在一起，形成计算模型。三维模型的外形尺寸为 1 500 m ×1 800 m ×650 m，共划分了 64 175 个六面体单元和 10 940 个界面单元(模拟断层和层面)。二维模型尺寸为 2 000 m ×750 m，共划分了 67 393 个四边形单元和 1 039 个界面单元。



(a) 研究区域井上下关系——三维模型



(b) A-A 剖面——二维模型

图 1 数值计算模型(F206, F204, F105, F7 为断层)

Fig. 1 Schematic of numerical model(F206, F204, F105 and F7 denote faults)

2.3 计算参数的选择

根据研究区域的岩层柱状图和煤岩物理力学实验结果，确定计算模型的基本参数。此外，模拟计算还涉及一些附加材料，如断层、充填材料、采空区垮落矸石和支护结构等。

(1) 表土层物理力学参数

表土层是塑性较强的弹塑性地质材料，在材料达到屈服极限后，可产生较大的塑性流动。本研究对表土(黄土、土砾岩、砾岩)采用莫尔-库仑屈服准则

$$f_s = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c \cos \phi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (1)$$

式中： σ_1, σ_3 分别是最大和最小主应力； c, ϕ 分别为表土的粘结力和摩擦角。当 $f_s < 0$ 时，表土将发生剪切破坏。表 1 给出了表土层的力学参数。

表 1 表土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

表土名称	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹模 / MPa	泊松比	抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	粘结力 / MPa	内摩擦角 / (°)
粘土	18	10	0.30	0.010	0.002	0.020	15
土砾岩	20	15	0.30	0.017	0.0015	0.015	18
砾岩	22	20	0.30	0.043	0.001	0.010	24

(2) 岩石与煤物理力学参数

根据大量岩石力学实验证实，岩石破坏后强度有所降低，产生弱化，这是莫尔-库仑准则所不能反映的，故本文对岩石和煤采用虎克-布朗 (Hoek-Brown) 强度准则：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (2)$$

式中： σ_1 是在岩石峰值强度时的最大主应力； σ_3 是最小主应力； m, s 是材料常数，取决于岩石性质和原始破裂状况； σ_c 是岩石单轴抗压强度。此外，当拉应力超过材料的抗拉强度时，材料将发生拉破坏。表 2 给出了实验测试的岩石和煤的物理力学参数。

(3) 断层物理力学参数

断层的存在将在很大程度上影响岩层移动的规律和特征。在采动影响下，断层将产生滑移和张开与闭合。表 3 给出模拟计算采用的断层的力学参数。

(4) 冒落矸石物理力学参数

采空区冒落的矸石是一种松散介质，它对顶板支撑的力学作用可近似地用弹性支撑体表述，垮落带的高度是采高的 6~8 倍。随着工作面的推进，矸石在覆岩作用下逐步被压实，材料的密度，弹性模量 E 和泊松比 ν 都应随时间而增加，可由以下经验公式表述：

$$\rho = 1600 + 800(1 - e^{-1.25t}) \quad \text{kg/m}^3 \quad (3)$$

$$E = 15 + 175(1 - e^{-1.25t}) \quad \text{MPa} \quad (4)$$

$$\nu = 0.05 + 0.2(1 - e^{-1.25t}) \quad (5)$$

式中：时间 t 的单位为 a。

表 2 煤岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rocks and coal

岩石名称	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹模/MPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	m	s	残余 m	残余 s
页岩	26.5	5 500	0.25	45	0.40	4.5	0.04	0.45	0.004
砂页岩	26.3	6 500	0.23	55	0.44	5.0	0.04	0.5	0.004
砂泥岩	26.3	3 000	0.19	50	0.80	5.0	0.08	0.5	0.005
砂岩	26.2	10 400	0.20	80	0.91	7.0	0.08	0.7	0.008
铁砂岩	32	10 500	0.08	95	1.01	7.5	0.08	0.75	0.008
细砂岩	26.6	11 000	0.19	90	1.03	7.0	0.08	0.7	0.008
中砂岩	26.1	10 500	0.20	85	0.97	7.0	0.08	0.7	0.008
粗砂岩	25.6	10 000	0.21	75	0.86	7.0	0.08	0.7	0.008
粉砂岩	26.4	4 000	0.17	65	0.86	6.0	0.08	0.6	0.008
石灰岩	27.6	28 000	0.24	120	1.79	4.0	0.08	0.4	0.008
泥灰岩	26.5	25 000	0.16	140	1.86	4.5	0.08	0.45	0.008
煤页岩	21	2 200	0.30	15	0.06	1.0	0.004	0.1	0.000 4
煤	14	1 000	0.36	8	0.03	1.0	0.004	0.1	0.000 4

表 3 断层力学参数

Table 3 Mechanical parameters of faults

断层名称	法向刚度/ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$	切向刚度/ $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$	摩擦角/ $(^\circ)$	粘结力/MPa	抗拉强度/MPa
F7	1 000	400	22	0.4	0.000 1
4F105	2 000	800	25	0.4	0.000 1
4F206	2 000	800	25	0.4	0.000 1
4F204	2 000	800	25	0.4	0.000 1

3 计算结果及对比分析

该模型中模拟的工作面开采顺序为: 2602() 2602() 2602() 2604() 2608() 2604() 2610() 2612() 2614() 2610() 2612() + 2608() 2610() 2612() + 2608() 2610() 2612() + 2608() , 如图 2 所示。

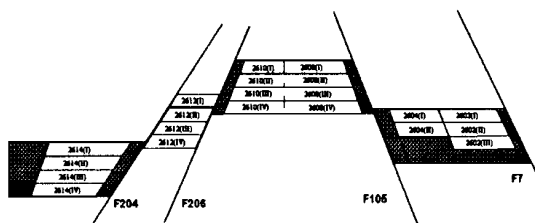


图 2 模拟的开采顺序

Fig. 2 Schematic view showing the mining order of panels

3.1 概率积分法预计结果

用概率积分法进行地表移动变形预计时, 其参数的选择是至关重要的, 一般需要经过现场观测, 将若干观测资料进行综合分析才能确定。对于新矿区, 可利用相邻矿区的观测资料来获取有关参数。根据鹤壁矿务局的观测资料, 充分采动时下沉系数

为 0.75, 水平移动系数为 0.3, 拐点偏移距为 30 m, 主要影响角为 63° 。当开采为非充分采动时, 这些系数还应作适当的修正。据此, 分别对图 2 中开采顺序的各开挖步骤进行了预计, 结果之一见图 4(d) ~ (f)。

3.2 数值模拟预计结果

根据建立的模型(图 1), 数值模拟方法首先根据表土层、煤和各岩层的物理力学参数(表 1, 表 2)、断层面力学参数(表 3)及模型边界条件计算初始应力场, 然后在初始应力场的基础上按开采顺序(图 2)逐一模拟开挖, 分别给出开采后的应力分布、位移分布等。根据 FLAC^{3D} 的计算结果, 用 SURF 自动绘制地表的移动变形等值线。2604() 工作面开采后的结果见图 3 和图 4(a) ~ (c)。

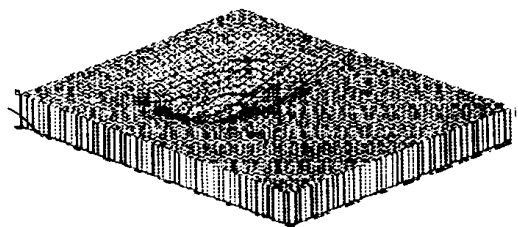
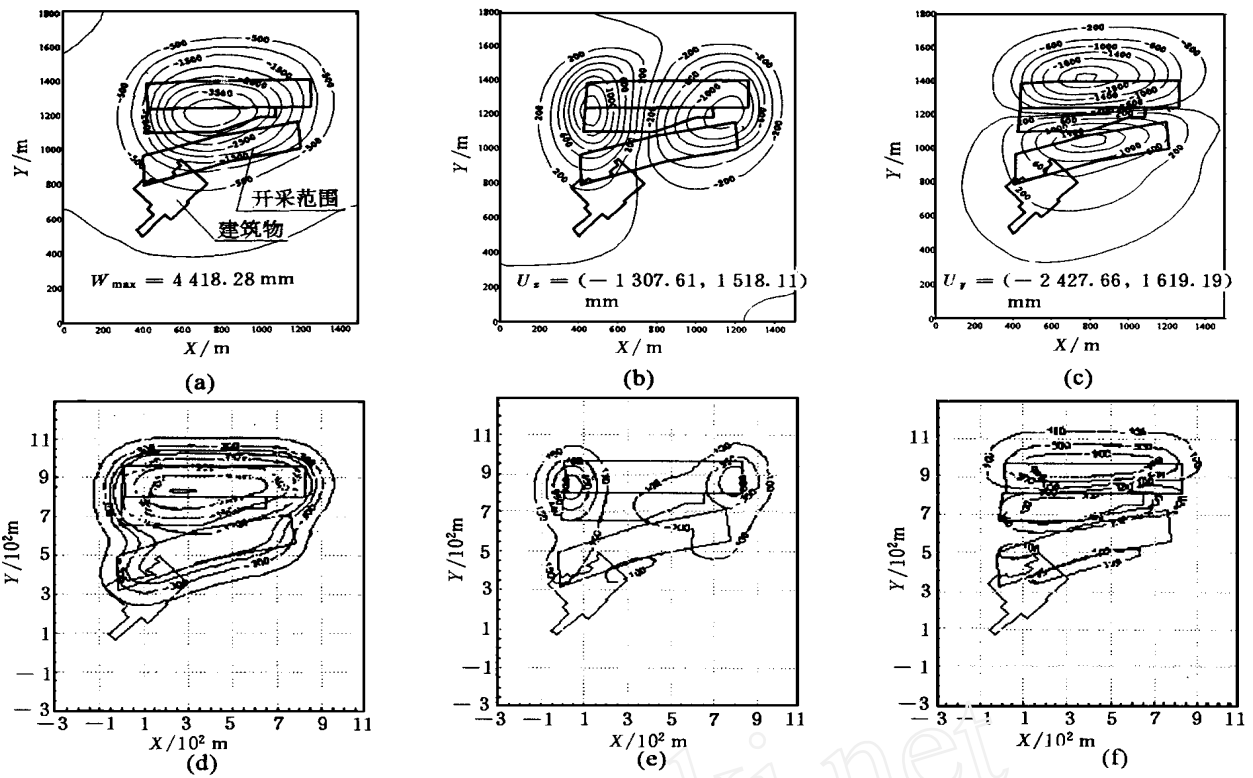


图 3 2604() 工作面开采后地表下沉形态

Fig. 3 Subsidence shape of ground surface after extraction of 2604()



(a) (b) (c) —数值模拟结果; (d) (e) (f) —概率积分法计算结果;
 (a) (d) —地表下沉; (b) (e) —X 方向位移; (c) (f) —Y 方向位移

图 4 2604()工作面开采后数值模拟结果与概率积分法结果的比较

Fig. 4 Comparison of results between numerical simulation method and probability integral method after extraction of 2604()

3.3 数值模拟与概率积分法预计结果对比分析

由图 4 可见,数值模拟预计结果图(4(a))略大于概率积分法预计的下沉量(图 4(d)),且数值模拟预计的下沉量的最大值的位置也与概率积分法预计的结果有所不同。另外,数值模拟方法预计的地表移动范围大于概率积分法预计的地表移动范围。

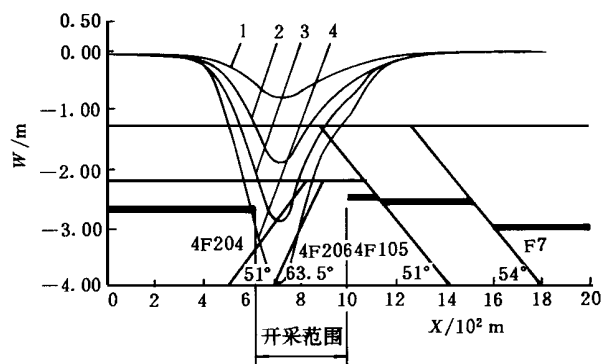
2604()开采后,同样造成数值模拟方法和概率积分法预计的 X 和 Y 方向的水平位移的不同(图 4),数值模拟方法预计的水平位移(图 4(b), (c))大于概率积分法预计的水平移动(图 4(e), (f)),且用两种方法的 X 和 Y 方向水平位移最大值的位置也是不一样的。

由此可见,数值模拟的结果无论在量值上,还是在最大值的位置上都不同于概率积分法的预计结果,显然是由于数值模拟方法中考虑了断层的缘故,换句话说是由于断层的影响造成的。另外,更重要的一点是,比较图 4(b), (e)和(f)还可发现,数值模拟预计方法与概率积分法造成的 Y 方向水平位移上的差异(图 4(c), (f))也大于 X 方向水平位移上的差异,原因是因为研究区域的断层主要是沿 Y 方向分布的

(图 1)。

为了进一步研究断层的影响,还利用平面模型(图 1(b))对开采顺序进行了模拟,开采顺序为: 2612() 2614() + 2610() 2612() 2614() + 2610() 2612() 2614() + 2610() 2612() 2614() + 2610()。由于开采区域含有 4F204 和 4F206 两条断层,可以推断地表下沉最大值的位置不会在开采范围的中心。由于概率积分法不能考虑断层的影响,故预计的地表开采沉陷最大值的位置一般都是在开采中心,不能很好地反映断层的影响。而岩石力学数值模拟预计方法却能很好地反映这一特点,图 5 分别给出了通过数值模拟方法预计的第 1 分层到第 4 分层开采结束后地表下沉曲线,可见地表下沉曲线最大值的位置并不在开采中心,而产生了偏移。进一步说明了数值模拟预计方法在反映断层影响方面的优越性。

2602()工作面开采后引起的地表下沉和水平位移的现场观测,初步证实了数值模拟预计方法的正确性。



1——第 1 分层开采后; 2——第 2 分层开采后;
3——第 3 分层开采后; 4——第 4 分层开采后

图 5 二维模型预计的地表开采沉降

Fig. 5 Subsidence of ground surface estimated
with two dimensional numerical model

4 主要结论

从上面的分析可以看出, 当研究区域内存在断层时, 由于经典的概率积分法不能考虑断层的影响, 致使其不能合理地预计地表移动与变形, 尤其是不能合理地预计地表移动(包括垂直下沉和水平移动)最大值的位置。在这种情况下, 用 FLAC 等数值模拟方法不失为一种合理的选择, 该方法克服了概率

积分法需要确定一些预计参数的缺点, 无需作任何假设和确定一些关键的参数, 完全是建立在客观反映原型(煤岩层位、物理力学参数和断层等地质构造)和模拟开挖过程力学效应的基础上, 模型越能反映原型的客观条件, 就越能准确地预计开采引起的地表变形, 所以在数值模拟方法中, 对原型的考察、研究和合理的简化是十分重要和必要的。

应该指出, 由于 FLAC 是时间渐进的, 相应的计算次数隐含了时间因素, 和物理时间具有一定的对应关系。因而一般来讲, 计算步数越多, 对应的时间越长, 模型发生的变形也越大, 这一特性有别于其他种类的数值计算程序, 在确定计算步数时应特别注意。为了真实地模拟开挖的时间效应, 本文在计算时, 特别注意模拟了工作面的推进度, 根据开挖一定长度所需要的时间来确定计算步数, 并据此逐步提高采空区内矸石的物理力学参数。

参 考 文 献

- 1 黄乐亭. 村庄压煤开采的技术途径. 中国煤炭, 1996, (242): 33 ~ 35
- 2 何国清, 杨伦, 凌赓娣等编. 矿山开采沉降学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991
- 3 王金庄, 邢安任, 吴立新编著. 矿山开采沉降及其防治. 北京: 煤炭工业出版社, 1995

APPLICATION OF FLAC TO PREDICT GROUND SURFACE DISPLACEMENTS DUE TO COAL EXTRACTION AND ITS COMPARATIVE ANALYSIS

Xie Heping¹ Zhou Hongwei¹ Wang Jin an¹ Li Longzhong² M. A. Kwasniewski³

(¹ Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083 China)

(² Hebi Coal Mining Bureau, Hebi 456600 China) (³ Silesian Technical University, Poland)

Abstract FLAC^{2D}3.3 and FLAC^{3D}1.0 are used to predict surface mining displacement of No. 4 Coal Mine of Hebi Coal Mining Bureau, Henan Province. By comparing the results of classical method(probability integral method) with the results of FLAC, it is shown that FLAC, which can simulate the actual geological conditions and improve insufficiency of the classical method, is a simple and effective way.

Key words FLAC, surface displacement due to coal extraction, prediction of surface displacement due to coal extraction, numerical simulation