

也就是说,在此阶段  $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4/C_2H_6$  的预测结果正确性的可信度要比 CO 高。

通过以上分析可知,在缓慢氧化阶段,出现的标志气体为 CO 和  $C_2H_6$ 。CO 出现较早,而且随温度变化,表现出来的规律性要强于  $C_2H_6$ ,所以该阶段主要用标志气体 CO 进行预测预报。但在加速氧化阶段,通过对各标志气体灰色关联分析可知,烃类气体指标( $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4/C_2H_6$ )要比 CO 的可信度高;所以在此阶段,当烃类气体指标的预测结果与 CO 的预测结果发生矛盾时,要以烃类气体指标为主要依据,避免发生误报。

### 3 结 论

应用灰色关联分析法,通过计算各标志气体与煤自燃氧化温度之间的灰色关联度,确定不同标志气体对于预测结果的可信度的大小,从而提高了预测结果的正确性,避免发生误报或漏报,也使得气体分析法在进行煤自然发火预测预报时更加准确、可靠。

#### References(参考文献):

- [1] LUO Haizhu(罗海珠), LIANG Yuntao(梁运涛). Current status and perspective of forecast and prediction techniques for spontaneous combustion of coal[J]. China Safety Science Journal (中国安全科学学报), 2003, 13(3): 76-78.
- [2] 罗庆国,徐国新. 灰色关联分析与应用[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- [3] 刘思峰,郭天榜,党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

### Grey correlation analysis of indicator gas for early predicting the coal spontaneous combustion

WANG Fu-sheng, YUE Zhi-xin, GUO Li-wen

(College of Resource and Environment, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, Hebei, China)

**Abstract:** In this paper, the basic principle and method of grey correlation analysis is briefly introduced. The correlative degrees of the temperature of oxidation of coal and every indicator gas are figured out. The primary and secondary relation of the indicator gases is established. It provides basis for the veracity of predicting spontaneous combustion.

**Key words:** safety engineering; coal; spontaneous combustion; prediction; grey correlation analysis

**CLC number:** TD75+2.1 **Document code:** A

**Article ID:** 1009-6094(2006)S-0073-03

文章编号: 1009-6094(2006)S-0075-04

## 覆岩采动裂隙带发育规律的数值模拟分析\*

任 强, 刘伟韬

(山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建教育部

重点实验室, 山东青岛 266510)

**摘 要:** 运用 FLAC-3D 数值模拟软件,对特定开采条件下覆岩破坏发育规律进行分析。通过现场实测,获取基础数据。建立合理的数学模型,对实测数据进行反演计算。数值模拟分析获得的结果准确可靠,可以预计类似条件下的覆岩采动裂隙带发育高度。

**关键词:** 安全工程; FLAC-3D; 数值模拟; 裂隙带

**中图分类号:** TD325

**文献标识码:** A

### 0 引 言

明确覆岩破坏形态规律是合理确定矿井开采边界的基础,也是矿井水体下采煤安全生产的关键<sup>[1]</sup>。因此,研究覆岩破坏规律十分重要。运用三维连续体快速拉格朗日分析 (FLAC-3D) 数值模拟软件对覆岩采动裂隙带发育规律进行分析,具有工程量小、操作方便、结果较准确等优点。

### 1 FLAC-3D 简介

三维连续体快速拉格朗日分析 (FLAC-3D) 是由美国 Itasca Consulting Group Inc 开发的三维显式有限差分法程序,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为。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<sup>[2]</sup>。

### 2 FLAC-3D 在地下工程应用中的几个问题

#### 2.1 地下工程中的模型建立

FLAC-3D 具有强大的自动三维网格生成器,其内部定义了多种基本单元形态,用户还可以用 FISH 自定义单元形态,通过组合基本单元,生成相对复杂的三维网格。这样就大大降低了地下工程中网格划分的难度,提高了模型建立的速度。

#### 2.2 边界条件的处理

##### 1) 应力边界条件

FLAC 在默认情况下,边界为自由表面(一种特殊的应力边界条件),使用其内部命令可以给出任一边界或部分边界的外力和应力情况。在地球坐标系 ( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) 中,应力为  $S_{xx}$ 、 $S_{yy}$ 、 $S_{zz}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{xz}$ 、 $S_{yz}$ , 向量坐标中 ( $D$ 、 $S$ 、 $N$ ) 中通过法向力、切向力给出应力。

##### 2) 位移边界条件

FLAC 不能直接控制位移。实际上,位移并不参与 FLAC 的计算。FLAC 通过速度来控制位移。这里所说的速度与物

\* 收稿日期: 2006-06-01

作者简介: 任强,研究生,从事灾害预防与防治研究; 刘伟韬,副教授,从事灾害预防与防治研究。

理中的速度概念有一些差别,它实际上是单位计算时步(STEP)的位移平均值。

2.3 初始地应力的模拟

在进行开挖或建设前,岩体已经处在一种应力状态下。这种初始状态,就是岩体所在的初始应力场。多数情况下,这种初始条件没有具体的资料。这时,使用 FLAC-3D 可以通过现有资料来模拟初始应力场。

初始的自重应力场可先在自重条件下计算至平衡,然后再将所有的节点位移置零。这时在单元中就已经加了初始的自重应力场。对于初始的构造应力场,需要运用 FLAC 中内嵌的 FISH 语言编写程序来添加<sup>[3]</sup>。

3 覆岩破坏发育情况数值模拟方法研究实例

本文以山东省枣庄某煤矿为研究对象。该矿为斜井开拓方式,单水平单一采区上下山开采,中央并列抽出通风方式,主要开采 2 煤层和 3 煤层。本文中作为原型的 2101 工作面开采的是山西组中上部的 2 煤,属较稳定中厚煤层。煤层最大厚度 3.5 m,最小厚度 1.8 m,平均煤厚 3.0 m;煤层倾角 0°~30°,平均 10°;工作面走向长 90~300 m,倾斜长 510 m。2101 工作面是 2 煤首采工作面,东临 F3 边界断层,西靠 2 煤缺失边界,北部是 2 煤 - 40 m 开采上限,南至 2 煤集中运输巷保护煤柱,其周围均为未采区。

3.1 采动覆岩裂缝带高度的经验公式

裂缝带高度的准确预计是合理设计观测钻孔布位和设计钻孔参数的前提。2 煤层覆岩 50 m 范围内以中砂岩、砂质泥岩、细砂岩为主,属于中硬岩层。根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,煤层覆岩为中硬型岩层的,煤层采后覆岩导水裂缝带高度的预计公式为:

$$H_{Li} = \frac{100}{1.6} \frac{M}{M + 3.6}$$
 (1)

式中  $H_{Li}$  为导水裂缝带高度, m;  $M$  为累计采厚, m。

按开采厚度为 2.2 m 计算,由式(1)计算的采后覆岩导水裂缝带高度为 30.9 m。考虑到可能出现局部导水裂缝带高度过大的异常情况,预计导水裂缝带最大发育高度为 35 m。

3.2 现场观测

为了确定数学模型参数的正确性,对已开采的 2 煤层进行覆岩裂缝带高度观测,采用的方法为井下仰孔分段注水观测法。

3.2.1 观测方法简介

在钻孔分段注水法的操作过程中,需要在井下向上(或向下)打一任意仰(俯)角的钻孔,然后进行分段注(放)水,根据水量判定采动冒裂带最大高度。

3.2.2 观测方案设计

1) 观测剖面布置

观测剖面开始设在 2101 工作面(下)的 H37 号导线点位置,在此施工了采前钻孔,方位基本平行于 H37 和 H36 导线点连线方向,钻孔倾角 65°,孔深 60 m。采前孔观测完毕后,由于受到地质条件的限制,采后观测地点进行了变更,移到 H7

和 H8 导线点之间的一条巷道内,采前和采后孔之间相距约 30 m。

2) 观测钻孔设计

为观测不同角度、不同高度处的钻孔漏水情况,在设计观测剖面的钻场里拟布置 4 个观测钻孔。其中,1 号孔打在未受采动影响的岩层里,以探测原岩裂隙原始发育情况,作为采后覆岩裂隙发育的对比基础,另外 3 个为采后孔。

3.2.3 采动覆岩裂缝带高度观测结果

根据观测数据做出的钻孔分段注水漏失量图(见图 2),可以确定覆岩破坏的发育高度。

3.2.4 煤层采动覆岩裂缝带分布规律

将通过各采后钻孔观测到的最大裂隙发育高度列入表 1。

综合 3 个采后钻孔的观测资料发现,2101 工作面开采后 2 煤层顶板覆岩采后形成的裂缝带呈现连续大范围漏水的特征,特别是在裂缝带顶界附近,注水漏失量非常明显,其顶界在煤层顶板以上垂高 39.3 m 处,最大裂隙发育位置在煤层顶板以上垂高 36 m 左右。

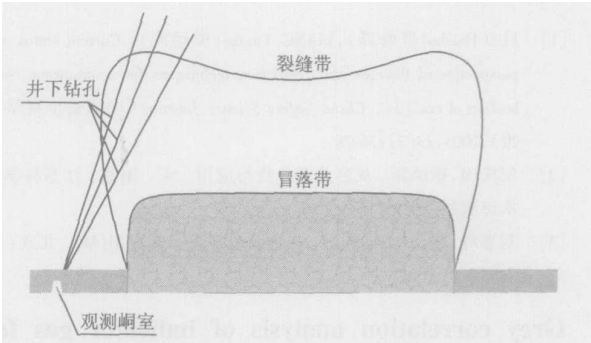


图 1 井下钻孔法观测示意图

Fig. 1 Sketch map of boring measurement

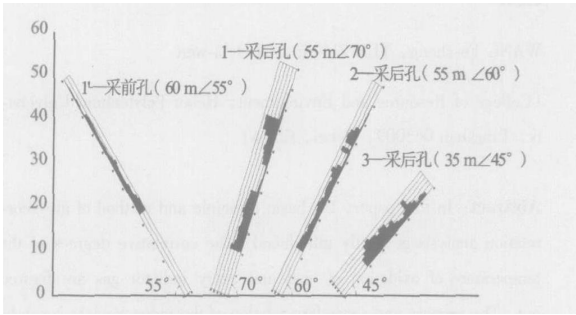


图 2 钻孔分段注水漏失量图

Fig. 2 Quantity of loss water in boring drill

表 1 2101 工作面最大裂隙发育高度

Table 1 Max crack height

孔号	倾角/(°)	最大裂隙发育高度/m
1	70	35.7~39.3
2	60	33.8~36.4
3	45	8.5~13.4(冒落带高度)
综合		33.8~39.3

表 2 计算岩层组物理力学性质指标  
Table 2 Mechanical parameters of rock

岩组 编号	岩层组 名称	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹模/ MPa	泊松比	黏结力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	抗拉强度/ MPa
1	粉质黏土	19	10	0.30	0.015	15	0.002
2	细砂岩	26.5	11 000	0.19	7.33	30.9	1.03
3	中细砂岩	25.9	10 000	0.21	6.25	29.4	0.97
4	粗砂岩	25.6	10 000	0.19	7.35	31.8	0.86
5	砂质泥岩	26.3	3 000	0.19	1.22	29.3	0.80
6	粉砂岩	26.4	4 000	0.17	1.30	22	0.86
7	粉细砂岩	26.6	6 000	0.23	1.45	26	1.05
8	煤	14	1 000	0.36	1.05	21	0.03

实测资料表明,2 煤层 2101 工作面采后覆岩裂隙带呈现整体连续性特征,顶界高度为 39.3 m,裂采比 17.8;冒落带的发育位置在 9.3 m 左右,冒采比为 4.23。

3.3 覆岩裂隙带发育高度数值模拟分析

3.3.1 物理模型的建立

地质背景及数值计算模型为新宏煤矿 2101 工作面和 J2 钻孔柱状图,原岩地应力为大地静力场型。各岩层之间为整合接触,岩层内部为连续介质,因此模型中不考虑地下水活动的影响。各岩土层均按 J2 钻孔柱状图中钻探揭露的岩土层布置,地面为自由边界,模型左、右边界均施加水平约束,底边界均施加水平及垂直约束。

3.3.2 计算参数

计算参数见表 3。

3.3.3 模型设置

模型尺寸设置为:长 300 m、宽 250 m、高 120 m。划分单元数为 20 250 个。根据煤层顶底板岩层各层的岩性、厚度、弹性模量、泊松比和抗拉强度赋值,将每个岩层划分为一定数量的单元。首先,计算开采 2 煤层时的顶板岩层破裂高度,即裂隙带高度,与实测的裂隙带高度相比,如果与实际观测结果相差较大,说明模型中设置的某些参数与实际不符,则需对模型的参数进行修改,应用修改后的模型再次计算裂隙带高度并与实测结果对比。如此反复修改模型参数,直到算出的裂隙带高度与实测结果一致或接近,此时的模型为代表本矿实际情况的模型,可用于预测 3 煤层开采后裂隙带的高度。

3.3.4 模拟结果

按照 20 m 的开挖步距,先后对 2 煤层和 3 煤层进行开挖,通过数值模拟计算,获得分步开挖后数值模拟的最大主应力分布图和塑性破坏区域分布图。

3.3.5 模拟结果分析

地下煤层采出后,采空区顶板岩层在自重及其上覆岩层作用下,向下弯曲、移动,当其内部拉应力超过岩石的强度极限时,直接顶板便断裂、破碎而冒落。其上部的老顶岩层以梁弯曲的形式沿层面的法线方向移动、弯曲,进而断裂。

地下煤层采出后,采空区周围的岩石发生了较为复杂的移动和变形,就煤层上面的覆盖岩层而言,其一般的移动过程是:从煤层的直接顶岩层开始,由上向下依次进行冒落、断裂、离层、裂隙等。

表 3 影响带计算参数与原岩力学参数对比

Table 3 Parameters contrast table

影响带	弹性模量 $E$ /MPa	抗剪强度 $C$ /MPa	内摩擦角/ $(^{\circ})$
裂隙带	0.1	0.001	0.1
冒落带	0.02	0.000 1	0.01

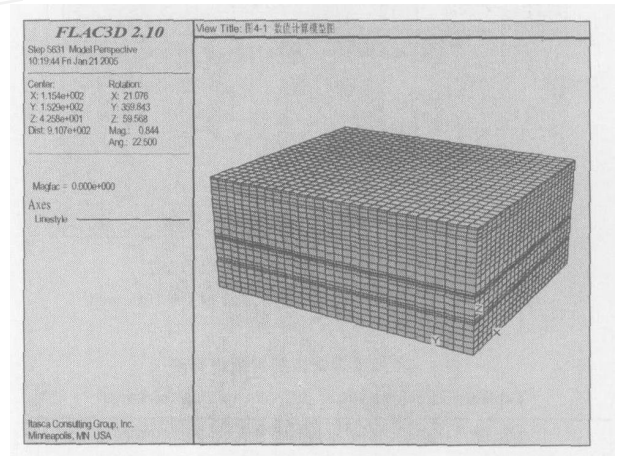


图 3 数值模拟计算模型

Fig.3 Model of the numerical simulation

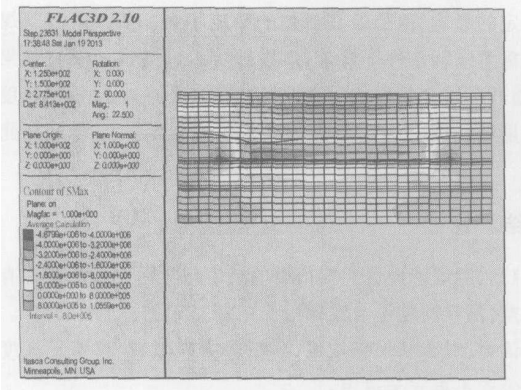


图 4 2 煤层第 10 时步最大主应力色谱图

Fig.4 2# main stress chromatogram map of the 10th step

应用所确定的模型计算的 2 煤层和 3 煤层开采后的裂隙带高度见表 4。

本次模拟的 2 煤层采后裂隙带发育高度为 38.5 m,3 煤层开采后 2 煤层顶板裂隙带发育高度有所增加,达到 43 m,可以看出位于下部的 3 煤层的开采对于 2 煤层的裂隙带发育有

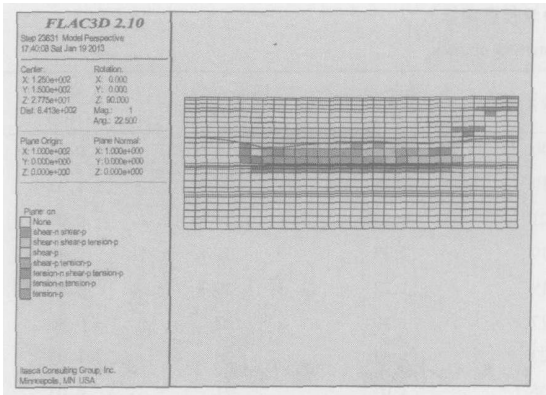


图 5 2 煤层第 10 时步塑性破坏区域图

Fig.5 2# plastic nature damage map of the 10th step

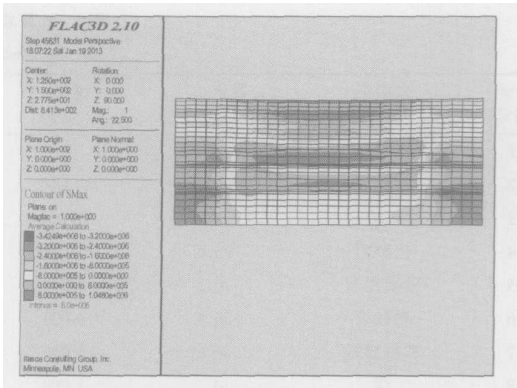


图 6 3 煤层第 10 时步最大主应力色谱图

Fig.6 3# main stress chromatogram map of the 10th step

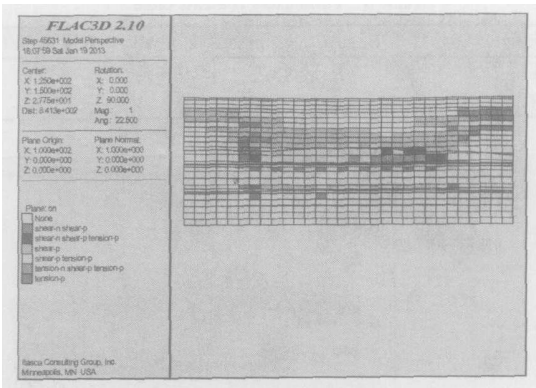


图 7 3 煤层第 10 时步塑性破坏区域图

Fig.7 3# plastic nature damage map of the 10th step

表 4 不同采厚对应的裂缝带高度

Table 4 Crack height of different mining thickness

开采煤层	2 煤层	3 煤层
模拟裂缝带高度/m	38.5	43.0

有一定的影响,但是使其增加的高度不大。前人对近距煤层开采重复采动条件下冒落带、裂缝带发育高度的研究结果显示,随开采层数的增加裂缝带发育高度增加,但增加的幅度随开采层数的增加而逐渐减小。本研究中的模拟结果与此相符。

4 结 论

- 1)运用统计经验公式得出的结论与实际观测的结论有较大误差,预计的结论与实际情况的相对误差达到了 30 %。因此可认为,对于新采煤技术,《规程》中裂隙带、冒落带高度的预测公式不再完全适用。
- 2)在资料完备的情况下,数值模拟手段对相似条件工作面的仿真模拟是准确的,而且该方法可以随意设置不同开采厚度的模型进行预测,并且可以运用模拟所得数据指导生产。
- 3)运用数值模拟方法,可以对类似条件下的采动覆岩裂隙带发育高度进行预测,并可大大降低生产成本。

References(参考文献) :

[1] GUO Weijia (郭惟嘉), MAO Zhongyu (毛仲玉). *Overburden subsidence bed separation and control technology* (覆岩沉陷离层及工程控制) [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.

[2] LIU Bo (刘波), HAN Yanhui (韩彦辉). *Flac theory, example and application guide* (FLAC 原理、实例与应用指南) [M]. Beijing: China Communication Press, 2005.

[3] GAO Mingzhong (高明中). The numerical analysis on the stress distribution and the displacement of the top coal in sublevel caving mining [J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute* (湘潭矿业学院学报), 2003, 18(2) : 9-12.

Numerical simulation analysis of overburden crack belt developing disciplinary

REN Qiang ,LIU Wei-tao

(Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control , Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510 , Shandong , China)

**Abstract :** The numerical simulation software FLAC-3D can be used to analyze the developing disciplinary of the roof breakage. It needs to measure , get basic data , found suitable mathematics model , numerical simulation analysis , and the results are credibility and accurate . And the conclusion can be used to forecast the crack developing height of the roof breakage.

**Key words :** safety engineering ; FLAC-3D ; numerical simulation ; crack belt

**CLC number :** TD325 **Document code :** A

**Article ID :** 1009-6094 (2006) S-0075-04