

文章编号: 0253-9993(2008)01-0028-05

# 多煤层条带开采地表移动规律

张立亚, 邓喀中

(中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 采用 FLAC 数值模拟软件, 系统地研究了多煤层条带开采中不同采深、不同采宽、不同层间距和上下煤柱的空间位置关系对地表下沉和水平移动的影响规律, 给出了地表最大下沉、最大水平移动与采深、采宽、层间距及上下煤柱位置的函数关系式, 建立了地表最大下沉和最大水平移动的综合影响关系式。

**关键词:** 多煤层条带开采; 地表移动; FLAC; 数值模拟

**中图分类号:** TD823.6      **文献标识码:** A

## The law of surface movement for multi-coal seam strip mining

ZHANG Li-ya, DENG Ka-zhong

(College of Environment and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** Based on the FLAC numerical simulation software, the laws of the surface subsidence and horizontal movement in multi-coal seam strip mining were studied systemically for the different depths, different mining widths, different distance between seams and the special relations of the upper pillar and the lower pillar in vertical direction. The function relations between the maximum subsidence, the maximum horizontal movement and above factors were given. Finally the formula indicating the integrated effects on the maximum surface subsidence and the maximum horizontal movement was deduced.

**Key words:** multi-coal seam strip mining; surface movement; FLAC; numerical simulation

在保证地面建(构)筑物安全的前提下,最大限度地开采煤炭资源是开采沉陷学科目前面临的主要问题<sup>[1]</sup>。建筑物下采煤的关键问题之一是控制岩层及地表沉陷,岩层与地表沉陷控制也是矿山开采沉陷学的主要研究方向之一<sup>[2]</sup>。目前控制岩层及地表移动的方法主要有充填开采、部分开采、覆岩离层注浆等。尽管条带开采的资源回收率低,但由于它能有效地控制上覆岩层和地表沉陷,保护地面建(构)筑物和生态环境,有利于安全生产,不需要增加生产成本,生产管理简单,在我国煤矿区被广泛采用<sup>[3]</sup>。

国内外学者对条带开采进行了大量研究,取得了丰富的理论和实际成果,但绝大部分是针对单一煤层条带开采<sup>[4~6]</sup>。近年来,多煤层条带开采的研究和应用逐年增多<sup>[7~9]</sup>。但从多煤层条带开采设计和实践来看,目前尚存在以下不足:①多煤层条带开采的地表沉陷的预计模型和预计理论尚未建立,传统的预计方法的预计结果与实际差别较大;②多煤层条带开采预计参数体系尚未建立,现有多煤层条带开采地表移动预测参数的选取缺乏可靠的理论和方法;③多煤层条带开采优化设计理论、煤层群条带开采布置方式的研究尚不完善,等等。本文通过数值模拟,系统研究了多煤层条带开采时,不同开采深度、不同层间

收稿日期: 2007-01-16      责任编辑: 柴海涛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50474064)

作者简介: 张立亚(1982—),男,河北赵县人,硕士研究生. E-mail: lyzhang47@163.com

距、不同采宽和上下煤柱空间位置关系对地表移动规律的影响,建立了地表移动与它们的影响关系式,为多煤层条带开采地表移动预测,提供了可借鉴的理论和方法。

## 1 多煤层条带开采模拟方案

### 1.1 数值模拟模型及边界条件

采用 FLAC 进行数值模拟研究<sup>[10]</sup>,主要研究不同开采深度、不同开采宽度、不同层间距离、上下煤柱位置关系(上下煤柱完全对齐、一半对齐、完全错开)等对地表移动变形及煤柱稳定性的影响。根据以上模拟目的,构建数值模拟模型。开采模型视为平面应变模型,模拟上覆岩层各分层内部为连续介质。模型采用位移边界条件,两侧为限定水平方向的位移,模型底部为限定垂直和水平方向的位移。在分析计算过程中,不考虑构造应力对原岩应力的影响,仅考虑岩体自重引起的应力,即模型处于静止应力状态。岩体内部初始应力状态取决于上覆岩层的质量和性质。

根据模拟目的所选的研究地质采矿条件:近水平煤层,设计的条带采出率为 50%。为保证地表面达到

充分采动,根据条带采宽,设计的开采区长度为 400 m。为避免边界效应的影响,设计的模型计算剖面为长 1 200 m。水平方向每 5 m 一个格网,垂直方向按分析目的不同、单元的大小不同,每个模型共有 15 120 单元。根据上覆岩层材料的力学特征,采用莫尔-库仑屈服准则。根据现场实际条件,选取的模拟参数见表 1。

### 1.2 数值模拟方案

本次模拟是在上下煤层完全对齐、一半错开和完全错开的 3 种情况下,固定 50% 的采出率,分别模拟采深、采宽、层间距和层间岩性变化对地表下沉和地表水平移动的影响。完全对齐时具体方案见表 2。同样在上下煤层一半错开、完全错开时,所采用的方案和表 2 相同,只是随着错开的程度不同,上下煤柱错开的距离不同。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 多煤层条带开采地表下沉规律

#### 2.1.1 开采深度对地表下沉的影响

分析上下煤柱在对齐、一半错开和完全错开的情况下,各采深的最大下沉值随错开程度的变化规律。

根据模拟数据,回归得到地表最大下沉与开采深度之间的关系为

$$\text{完全对齐: } w_0 = 0.441H + 41.9 \quad (R^2 = 0.9555),$$

$$\text{一半对齐: } w_0 = 0.636H + 0.4 \quad (R^2 = 0.9825),$$

$$\text{完全错开: } w_0 = 0.926H - 64.1 \quad (R^2 = 0.9864).$$

式中,  $w_0$  为地表最大下沉值, mm;  $H$  为开采深度, m;  $R$  为相关系数。

在相同采深条件下,取对齐、一半错开和完全错开下的最大下沉值,采用线性回归的方法得到错开程度  $s$  (规定对齐时取 0、一半错开取 0.5 和完全错开时取 1,下同此规定)与地表最大下沉值的函数关系为

$$w_0 = 3s + 119.83 \quad (H = 200, R^2 = 0.9643), w_0 = 29s + 191.83 \quad (H = 300, R^2 = 0.9996),$$

$$w_0 = 73s + 211.5 \quad (H = 400, R^2 = 0.9950), w_0 = 150s + 255 \quad (H = 500, R^2 = 0.9868).$$

表 1 数值计算的岩石参数

Table 1 Rock parameters of simulation model

岩层名称	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦 角/(°)	单轴抗拉 强度/MPa	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
表土层	1	0.40	0.01	20	0	1 800
泥岩、砂泥岩互层	530	0.40	1.50	33	1.0	2 600
中粒、粉砂岩互层	1 190	0.26	6.25	33	2.6	2 640
老顶	1 250	0.22	8.56	37	3.0	2 500
直接顶	120	0.35	1.50	32	1.0	2 400
煤层	100	0.42	1.00	25	0.1	1 400
煤层底板	1 250	0.20	24.60	38	3.0	2 600

表 2 上下煤层对齐采宽、层间距和采深的模拟方案

Table 2 The simulation of width, distance and depth with upper and lower pillar in vertical direction

对齐方式	模拟方案	采宽/m	采深及覆岩厚度/m	层间距/m	上下采厚/m	层间岩性
上下留煤柱对齐采宽	模型 1	20	200	40	3	不变
	模型 2	30	200	40	3	不变
	模型 3	40	200	40	3	不变
	模型 4	50	200	40	3	不变
上下留煤柱对齐层间距	模型 1	20	200	10	3	不变
	模型 2	20	200	20	3	不变
	模型 3	20	200	30	3	不变
	模型 4	20	200	40	3	不变
上下留煤柱对齐采深	模型 1	20	200	表土 20	3	不变
				粗砂岩 90		
				泥岩 90		
	模型 2	30	300	表土 30	3	不变
				粗砂岩 135		
				泥岩 135		
	模型 3	40	400	表土 40	3	不变
				粗砂岩 180		
模型 4	50	500	表土 50	3	不变	
			粗砂岩 225			
			泥岩 225			

通过综合分析, 可以建立多煤层条带开采时, 地表最大下沉与采深、错开程度之间的关系式为

$$w_0 = (0.485H - 106)s + 0.4245H + 45.7.$$

从以上结果可以看出, 随着开采深度的增加, 煤柱及顶板受力增大, 导致地表沉陷量增加. 随着错开程度  $s$  的增大, 由于上煤层煤柱作用在下煤层采空区上的应力增大, 导致下煤层顶板弯曲量增大, 从而使地表沉陷量增大, 并使上煤层煤柱成线性关系. 以下采用相同的回归分析方法, 只给出综合表达式.

### 2.1.2 不同采宽对地表下沉的影响

根据模拟不同采宽数据得到的回归分析结果表明, 随着开采宽度增加, 顶板在同样应力作用下弯曲程度增大, 导致地表沉陷量增大. 在同样采宽条件下, 随着上下煤柱错开距离的增大, 地表沉陷量增大, 主要原因是随着错开程度的增加, 下煤层顶板所受的应力增大, 导致其弯曲量增大, 从而使地表沉陷量增大. 结果表明, 采宽越大, 错开程度对地表移动影响越大, 原因是下煤层采宽越大, 暴露的顶板越长, 在同样应力作用下, 弯曲量越大, 导致地表下沉越大. 多煤层条带开采地表最大下沉与开采宽度  $b$ ,  $s$  之间的回归关系式为

$$w_0 = (-20.359s + 75.4)e^{(0.0159s + 0.0245)b}.$$

### 2.1.3 不同层间距对地表下沉的影响

根据模拟不同层间距数据得到的回归分析结果表明, 在同样采深条件下, 当上下煤柱完全对齐时, 随着层间距与下煤层采宽比的增大, 地表下沉有增加的趋势, 但增加量不大. 当上下煤柱错开时, 有相反的规律, 随着层间距与下煤层采宽比增大, 地表下沉量减小, 主要原因是随层间距的增大, 岩梁弯曲刚度增大, 使下煤层顶板弯曲量减小, 从而使地表下沉减小.

由相同层间距下得到的错开程度与地表最大下沉值的函数关系表明: 层间距越小, 对上下煤柱错开程度的影响越大, 反之亦然, 到 40 m 层距后, 上下煤柱错开程度的影响最大为 3 mm, 可以忽略.

经综合分析, 可得到地表最大下沉与上下煤层间距/采宽 ( $h/b$ ) 及错开程度之间的关系为

$$w_0 = (-74.676s + 21.245) \ln(h/b) + 45.32s + 107.$$

模拟结果还表明,上下煤柱位置关系与层间距和下煤层采宽有关,当  $h/b$  较小时,随着上下煤柱错开程度的增加地表下沉增大,当  $h/b$  达到一定后,上下煤柱对齐与否,对地表移动无影响.在模拟的 200 m 开采深度条件下,当层间距为下煤层采宽的 2 倍时,上下煤柱对齐与否,对地表移动无影响.

## 2.2 多煤层条带开采地表水平移动规律

### 2.2.1 开采深度对地表水平移动的影响分析

根据模拟结果回归得到地表最大水平移动与开采深度为幂函数关系,表明随着开采深度的增加,地表水平移动增大,实际上随开采深度的增加,梁弯曲的厚度增大,从而使水平移动增大.

在相同的采深下,采用回归方法得到的错开程度与地表最大水平移动的函数关系表明:随着上下煤柱错开程度的增大,地表水平移动增大,并且这一增大趋势随开采深度的增大而增大.原因是在其它条件相同时,随开采深度的增大,下煤层采空区顶板所受的应力增大,使顶板弯曲量增大,从而导致地表水平移动增大.综合上述关系可得地表最大水平移动与  $H, s$  之间关系式为

$$u_0 = 2 \times 10^{-12} H^{5.0923} s + 0.3493H - 15.5,$$

式中,  $u_0$  为最大水平移动值, mm.

### 2.2.2 不同采宽对地表水平移动的影响

根据模拟数据(采深 200 m、层间距 40 m)得到不同条件下地表水平移动与采宽的函数关系表明:在上下煤柱对齐、一半对齐、完全错开 3 种情况下,随着采宽的增大,地表水平移动均增大,原因还是采宽增加,岩梁弯曲的长度增加,从而使弯曲量增大,导致地表水平移动增大.

同理在相同的采宽下,上下煤柱错开程度  $s$  与地表最大水平移动的函数关系式表明:随着上下煤柱错开程度的增大,地表水平移动增大,并且这一增大趋势随开采宽度的增大而增大.原因是在其它相同的条件下,随开采宽度的增大,下煤层采空区顶板长度增大,使顶板弯曲量增大,导致地表水平移动增大.

综合上述关系可得,地表最大水平移动与开采宽度、错开程度之间的关系式为

$$u_0 = (-1.0764 \ln s + 23.574) e^{(0.0197s+0.023)b}.$$

### 2.2.3 不同层间距对地表水平移动的影响

根据模拟数据得到不同层间距(采深 200 m)与地表最大水平移动值的函数关系式表明:当上下煤柱完全对齐时,随着层间距的增大,地表水平移动增大;而当上下煤柱不对齐时,随着层间距的增大,地表水平移动减小,减小程度随错开距离的增大而增大.原因是由于上下煤柱错开,上煤层引起的水平移动与下煤层引起的水平移动叠加,从而减小了两煤层开采后的综合水平移动.同理,由错开程度与地表最大水平移动值的函数关系表明:层间距越小,上下煤柱错开程度对地表水平移动的影响越大,反之亦然,到一定层距后,上下煤柱错开程度的影响可以忽略.

综合上述关系,可得地表最大水平移动与层间距  $h$ 、错开程度  $s$  的综合关系式为

$$u_0 = (15.219 \ln s + 168.34) h^{-0.6885s+0.1315}.$$

上面分析了多煤层条带开采条件下,地表移动与开采深度、采宽、层间距和上下煤柱之间的关系,初步明确了地表移动随这些因素的变化规律,所获得的规律对指导多煤层开采设计具有一定的理论和实用意义,所给出的计算公式对模拟条件下是适用的,如果实际条件与模拟条件不相同,可应用该规律进行分析,但计算出的地表移动变形值可能存在差异.限于篇幅限制,笔者将在另文进行分析.

## 3 结 论

(1) 地表下沉和水平移动与开采宽度成指数函数关系,随着采宽的增加(采出率不变),地表的下沉和水平移动值增大.在相同开采宽度的条件下,最大下沉值与上下煤柱错开程度呈线性增大关系,最大水平移动值与错开程度呈乘幂关系,采深越大水平移动值变化越快;错开程度越大,水平移动值变化越快.

(2) 在模拟条件下,随着层间距(在 10~50 m 之间变化)增大,上下煤柱对齐时,地表下沉和水平

移动逐渐增大, 上下煤柱错开时, 地表下沉和水平移动逐渐减小; 相同层间距下, 最大下沉与错开程度呈乘幂关系。

(3) 在上下煤柱错开方式条件下, 存在对地表移动不影响的极限层间距, 大于该层间距后, 煤柱的对齐与否对地表移动的影响较小, 在模拟条件下, 当层间距与采宽的比值大于 2 后, 上下煤柱对齐与否对地表移动无影响, 因此, 当  $h/b > 2$  后, 在进行多煤层条带开采设计时, 可以不考虑上下煤柱对齐方式。

#### 参考文献:

- [1] 何国清, 杨 伦, 凌赓娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994. 1~26.
- [2] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. 173~180.
- [3] 张华兴, 赵有星. 条带开采研究现状及发展趋势 [J]. 煤矿开采, 2000 (3): 5~7.
- [4] 郭增长, 谢和平, 王金庄, 等. 条带开采保留煤柱宽度和采出宽度与地表变形的关系 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18 (2): 13~17.
- [5] 郭文兵. 条带开采的非线性理论模型与应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.
- [6] 吴立新, 王金庄, 刘延安, 等. 建(构)筑物下压煤条带开采理论与实践 [M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994. 29~111.
- [7] 胡炳南. 煤层群条带开采优化设计原则 [J]. 煤矿设计, 2000 (4): 3~6.
- [8] 张俊英. 多煤层条带开采模拟理论研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (增): 67~70.
- [9] 张俊英. 多煤层条带开采的数值模拟研究 [J]. 矿业研究与开发, 1999, 19 (5): 4~7.
- [10] 刘 波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. 339~522.

## 煤制油重大突破: 甲醇逐步脱水生成汽油

由云南煤化集团解化公司、中科院山西煤炭化学研究所、化学工业第二设计院等共同设计开发的 3 500 t/a 合成汽油工业示范装置, 现已批量生产出合格汽油产品。这是国内目前已投运的、规模最大的煤变油中试装置, 意味着对我国西南地区储量丰富的褐煤资源进行有续开发将成为现实。

云南省煤炭保有储量 237 亿 t, 其中褐煤储量居全国第一。由于褐煤的碳含量和放热量较低、燃烧时烟雾大, 其应用仅限于火力发电厂和民用等。但是, 褐煤的氢含量相对高, 比其它煤种更容易液化。利用这一特点, 解化公司采用 3 家共同开发的固定床绝热反应器一步法甲醇转化制汽油技术及装置, 以甲醇为原料制取合格的汽油产品。据介绍, 该工艺的主要特征是: 甲醇逐步脱水转化生成汽油的全部过程, 在同一个反应器和触媒上完成。所得油品具有良好的挥发性和抗腐蚀性, 达到 GB17930-2006 车用汽油 (III) 的要求, 符合欧 III 排放标准; 油品成分仅有 27 种, 比现行的 93 号汽油成分 (有 128 种) 少许多, 杂质品种少、品质高, 属优质汽油; 并且它的抗爆能力好, 辛烷值合乎 93 号汽油要求。经检测, 油品的安定性好、诱导期长、实际胶质小, 完全可替代传统的 93 号汽油。我国已经发现的褐煤资源量为 1 291.32 亿 t, 约占我国煤炭保有资源量的 12.7%, 开发潜力巨大。

云南煤化集团有关人士表示, 该装置的主反应器是直径为 1 m 的固定床绝热反应器, 在此基础上可直接放大到单台反应器年产 10 万 t 汽油的规模。该项目的开发成功, 将有力推动我国能源结构的变革, 同时为云南省丰富的低热值褐煤利用找到切实可行、附加值高的路径, 为下一步我国煤制油产业的大规模工业化, 提供了技术支持和生产经验。