

## • 矿井地质 •

文章编号: 1001-1986(2004)03-0018-03

## 薄基岩条带开采覆岩与地表移动数值模拟研究

杨伟峰, 隋旺华 (中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 通过数值模拟模型, 分析了薄基岩条件下条带开采引起的覆岩破坏机理、地表的下沉和水平变形等移动变形值, 揭示了薄基岩条带综放开采引起的上覆岩土层的应力场、位移场及地表的移动变形规律, 为薄基岩条件下条带开采覆岩与地表移动变形的工程地质机理的研究奠定了基础。

**关键词:** 薄基岩; 条带开采; 数值模拟

中图分类号: TD325 文献标识码: A

## 1 引言

煤层条带开采法是保护矿区地面建(构)筑物的一种有效开采方法, 有关条带开采的实践经验也逐年增多, 然而对薄基岩条带开采的理论研究仍较少。薄基岩的工程地质性质指标中抗压、抗拉强度及弹性模量较正常厚度基岩的要小得多, 这就使得薄基岩条带开采时, 基岩层不能形成砌体梁一类稳定的“大结构”, 岩层内部的波浪式下沉无疑会向上部土层延伸, 岩层与煤柱的应力应变状态及煤柱的塑性区分布情况也势必区别于正常厚度基岩, 这些问题对开采的影响均需要做进一步的研究。

## 2 数值模拟计算模型的建立

## 2.1 从地质原型到物理模型

为了进行数值模拟分析, 首先选定矿区地质剖面进行概化, 主要考虑其地质特征、工程地质岩组划分及不同岩(土)组的工程地质特性等因素。

物理模型是在地质原型的基础上确定的, 它是数值分析中的首要问题。太平矿区地质构造简单, 可将岩体天然应力场视为自重应力场, 岩、土体均看作连续介质, 上覆土体可看作均质各向异性体。

本文选定山东省济宁市太平矿谢家口村庄北部走向剖面, 经概划归并得工程地质岩组柱状图(图1)。

## 2.2 数学模型

对土的弹塑性模式(Cambridge Model)与Biot 固结理论的耦合方程, 用有限元并结合时间上差分法进行求解。令  $\Delta t$  为时段长,  $\Delta u$ 、 $\Delta v$  和  $\Delta p$  为该时段内的位移和孔隙水压力增量, 采用等参元, 在平面上

用有限元离散化, 时间上用差分法分段后, 则单元方程可写成:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^n (K_{ij}^{11} \Delta u_j + K_{ij}^{12} \Delta V_j + K_{ij}^{13} \Delta P_j) &= \Delta F_i^1 \\ \sum_{j=1}^n (K_{ij}^{21} \Delta u_j + K_{ij}^{22} \Delta V_j + K_{ij}^{23} \Delta P_j) &= \Delta F_i^2 \\ \sum_{j=1}^n (K_{ij}^{31} \Delta u_j + K_{ij}^{32} \Delta V_j + \beta \Delta t K_{ij}^{33} \Delta P_j) &= -\Delta t \sum K_{ij}^{33} P_{0j} \end{aligned} \right\} (i, j=1, 2, \dots, n),$$

式中  $\Delta u_j$ 、 $\Delta V_j$ 、 $\Delta P_j$  为  $\Delta t$  时段内  $j$  结点的水平、垂直位移及孔隙水压力增量;  $\Delta F_i^1$ 、 $\Delta F_i^2$  分别为  $i$  结点的水平、垂直向荷载增量;  $P_{0j}$  为上一时段末  $j$  结点的孔隙水压力;  $\beta$  为差分常数;  $K_{ij}^{11}$ 、 $K_{ij}^{12}$ 、 $\dots$  等为方程式系数, 反映了  $j$  点对  $i$  结点的影响。

## 2.3 计算模型

计算模型建立在开采工程地质物理模型基础上, 其尺寸主要依据研究区钻孔工程地质岩组柱状图进行设计的, 剖面长 800 m, 深度为 210 m, 煤层平均埋深 188 m, 表土层厚 154 m, 煤层厚 8.8 m。按平面应变问题考虑。

采用四边形平面单元, 单元长 10 m, 高 2~10 m。模型共划分成 6110 个四边形平面单元。模型两侧的边界条件为限定水平移动的滑动支撑, 模型底部的边界条件为限定垂直位移的滑动支撑, 模型上部为自由边界。计算采用的岩石力学参数依据研究区煤柱区覆岩力学性质指标, 见表 1。

## 3 数值模拟方案及计算结果

方案一: 开采 5 个条带 ( $a=40$  m,  $b=40$  m,  $h=8.8$  m)。

方案二: 变化采高, 开采 5 个条带 ( $a=40$  m,

地层系统	累计层厚/m	层厚/m	岩层名称	柱状
第四系	150.00	150.00	表土层	~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
				~ ~ ~ ~
二叠系山西组	154.74	4.74	砂质粘土	
	157.14	2.40	泥岩	
	173.14	16.00	粉细砂岩	
	177.14	4.00	中砂岩	
	185.14	8.00	粉细砂岩	
	189.14	4.00	细砂岩	
	197.94	8.80	3号煤	
	200.04	2.10	炭质泥岩	
	210.04	10.00	细砂岩	

图1 研究区工程地质岩组柱状图

$b=40\text{ m}$ ,  $h=4.4\text{ m}$  和  $h=6.6\text{ m}$ 。

方案三:变化采宽,开采5个条带( $a=40\text{ m}$ ,  $b=50\text{ m}$ ,  $h=8.8\text{ m}$ ),然后使煤柱宽度不变,即 $a=40\text{ m}$ ,使采宽具有不同的宽度,即 $b$ 从左到右的宽度分别为30、50、60 m。

各方案模拟的上覆岩土体下沉形态图、水平移动形态图、水平与垂直方向的应力分布图、垂直方向的应变分布图等均可由数值模拟结果直接得到,这里仅以方案一(即采40 m留40 m,采厚8.8 m)部分示意图为例。(图2~4)

地表变形有关参数(表2)由上述数值模拟的各方案计算结果综合汇总得到。

#### 4 计算结果分析

煤层采出以后引起上覆岩土体中应力重分布,在煤柱一侧形成应力增高区,当采空区达一定范围,煤层顶板因拉应力和剪应力作用,发生垮落、变形和下沉,且变形从下向上一直发展到地表,引起地表沉陷,显示出特有的一些规律。

##### 4.1 岩土层应力场特征

###### 4.1.1 垂直应力分布

如图2,垂直应力( $\sigma_z$ )集中部位主要在煤柱的顶、底板及周围岩层中,应力集中最大值一般在煤壁线上,底板应力则向煤柱内部转移。

由于基岩层较薄,在土层中仍存在应力集中部位,主要位于煤柱正上方,靠近煤壁线(停

表1 煤柱区覆岩力学性质指标

编号	工程地质类型	厚度/m	累计厚度/m	重度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量/ $\times 10^3\text{ MPa}$	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
9	上覆土层	150	207.94	20.01	0.110	0.35	—	—
8	底粘土	4.74	57.94	20.08	0.206	0.3	—	—
7	风化泥岩	2.4	53.2	19.01	0.285	0.351	0.33	2.23
6	粉细砂岩	16	50.8	23.91	1.870	0.230	1.6	30.6
5	中砂岩	4	34.8	22.44	1.150	0.288	0.54	10.8
4	粉细砂岩	8	30.8	22.83	0.910	0.303	0.65	16
3	细砂岩	4	22.8	23.23	2.150	0.208	1.46	22.4
2	3煤	8.8	12.94	1.310	0.293	0.51	8.45	
1	细砂岩	10	10	24.70	4.010	0.261	1.49	29.9

表2 条带开采各方案数值模拟地表移动变形汇总表

开采方案 (留宽40m)	最大下沉 值/m	下沉系数 $/10^{-3}\cdot\text{m}^{-1}$	最大曲率 $/\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$	最大倾斜 $/\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$	最大水平 位移/m	水平变形 $/\text{mm}\cdot\text{m}^{-1}$
1 采宽40 m, 采厚8.8 m	0.797	0.0905	0.273	3.834	0.3397	2.179
2 采宽40 m, 采厚4.4 m	0.753	0.1711	0.260	3.639	0.3210	2.051
采宽40 m, 采厚6.6 m	0.797	0.1208	0.271	3.831	0.3396	2.176
3 采宽30 m, 采厚8.8 m	0.521	0.0592	0.190	2.572	0.2250	1.716
采宽50 m, 采厚8.8 m	1.102	0.1252	0.389	5.203	0.4535	3.281
采宽60 m, 采厚8.8 m	1.431	0.1626	0.535	6.660	0.5705	4.801

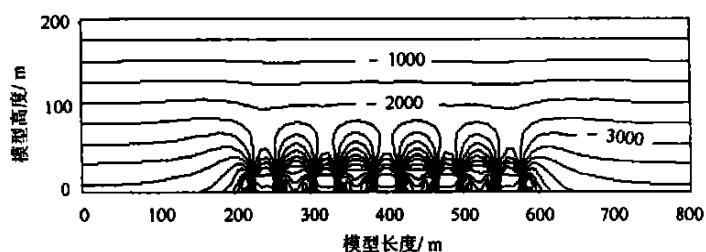


图2 开采5个条带( $a=40\text{ m}$ ,  $b=40\text{ m}$ ,  $h=8.8\text{ m}$ )后  
垂直方向的应力分布图(单位为MPa)

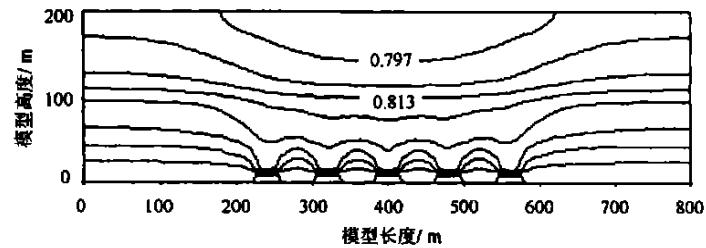


图3 开采5个条带( $a=40\text{ m}$ ,  $b=40\text{ m}$ ,  $h=8.8\text{ m}$ )后  
上覆岩土体沉降图(单位为m)

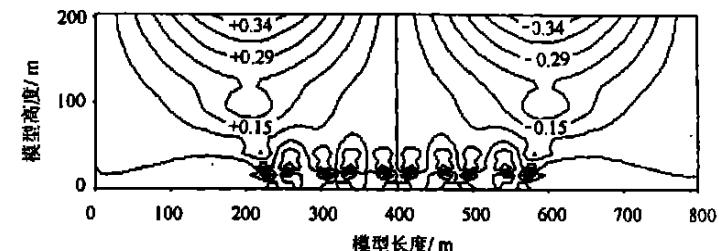


图4 开采5个条带( $a=40\text{ m}$ ,  $b=40\text{ m}$ ,  $h=8.8\text{ m}$ )后岩土体水平移动图  
+ - 表示两侧水平位移方向相反;单位m

采线)上方。随着接近地表,在一定的高度上,应力拱联成一个整体,应力集中程度逐步减弱。在采空区上方土层中,压应力降低值(一般未出现拉应力)向地表方向逐步减小。

#### 4.1.2 水平应力分布

水平应力( $\sigma_y$ )主要集中在煤柱顶板及靠近煤柱顶板的岩层中,煤柱上方覆岩中,水平应力集中部位从煤柱顶板向上,逐渐偏向采空区,到基岩顶部砂质泥岩中,最大的水平应力集中部位位于各采空区中心最上方。在煤柱下方底板岩层中,水平应力集中深入到煤柱内部。

土层中水平应力集中程度下部较大,向上逐渐减小,且主要分布在各采空区中心正上方的土层当中。

岩性不同,其水平应力集中程度也明显不同,尤其在软硬岩层界面处,硬岩层强度高,弹性模量大,有很高的水平应力,而软岩层应力集中程度较低。

### 4.2 岩土层位移场分析

#### 4.2.1 下沉(纵方向)

对位于不同深度上的岩层移动变形是不同的(如图 3)。由于矿区地层松散层厚,而岩层较薄,当煤层条带开采时,岩体逐步垮落。位于开采条带正上方的覆岩体,其下沉值由下向上逐渐减小;而位于条带煤柱正上方的覆岩体,其下沉值则由下向上逐渐增大。这种趋势直至发展到某一高度,数值模拟显示距离开采煤层 61.74 m 时,采空区上部与煤柱正上方的下沉值相等为止。在此高度以上的松散层,其下沉值基本保持稳定,逐渐平缓至形成单一的下沉盆地。

#### 4.2.2 水平位移

水平位移总体上变化较为复杂,距采空区的距离不同,水平位移呈现出不同分布。如图 4,以条采中心线为界,采空区两边水平位移方向相反,距采空区的距离越远,水平位移逐渐减小,靠近第一条带采空区处达到最大值,然后向采空区内部又逐渐减小,一直到第 3 条带中心线变为零;从中心线向第 4、5 条带水平位移变化了方向,并又增大到反方向的最大值,然后距采空区的距离越远,水平位移逐渐减小。

#### 4.2.3 岩层位移变形与地层条件的关系

a. 坚硬的砂岩类往往应变值较小,它控制着上部软弱岩类的移动和变形。

b. 两层坚硬岩层中间的软弱岩层,能起着调整其上下两岩层变形不协调的作用,吸收了不协调变形,使其本身的变形复杂化。

c. 位移和变形沿垂直于岩层方向变化较大的点,往往是不同岩层的交界面,因此,这些部位有可能产生离层和层间错动。

d. 整体位移量的大小主要受坚硬岩层的控制,而在土层中沉降主要受粘土层控制。

### 5 结论

a. 数值模拟图可直观地给出开采后覆岩应力场和位移场的分布,将条带开采覆岩移动变形破坏规律可视化。

b. 尽管基岩层较薄,但由于存在坚硬岩层的支撑、风化带对裂隙发育的制约以及基岩上部较厚的松散层,使基岩的不均匀移动变形变得缓和,也就使地表移动变形比较平缓,呈现单一的下沉盆地。

c. 对埋深 188 m,其基岩仅 34 m,采高为 8.8 m 的煤层,在保证条带留宽为 40 m 的情况下,设置条带采宽为 30~40 m 是合理的,即采出率为 42.86%~50%,均在砖石结构建筑物的破坏(保护)等级规程规定的Ⅱ级保护范围内,在这种薄基岩地层条件下,只要条采设计合理,是可以有效控制地表沉陷的。

d. 地表移动特征不仅取决于采矿因素,而且也取决于开采区内的地质因素,尤其是工程地质条件的影响,只有正确地认识和掌握这些因素,才能对地表移动的特征进行合理的解释,这样就可能有效的进行地表移动的预计和分析,这对开采沉陷的研究具有重要的意义。

### 参考文献

- [1] 杨伟峰.薄基岩条带开采覆岩与地表移动变形机理的研究及优化设计[D].徐州:中国矿业大学硕士论文,2003.
- [2] 桂和荣,孙家斌,李明好等.厚松散层及超薄覆岩条件下放顶煤开采防砂煤柱[J].煤田地质与勘探,2002,30(2):36—39.
- [3] 狄乾生,隋旺华,黄山民.开采岩层移动工程地质研究[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.
- [4] 朱晓梅,王厚柱.新集矿区松散层工程地质特征及地面沉降预测[J].煤田地质与勘探,1999,27(4):43—47.
- [5] 谢洪彬.厚冲积层薄基岩下采煤地表移动变形规律[J].矿山压力与顶板管理,2001,(1):59—60.
- [6] 赵国旭.大条带综放开采引起的地表移动变形规律及控制研究[D].北京:中国矿业大学北京研究生部博士论文,2000.
- [7] 张俊英.多煤层条带开采模拟理论研究[J].煤炭学报,2000,25(增刊):67—70.
- [8] 申宝宏,孔庆军.综放工作面覆岩破坏规律的观测研究[J].煤田地质与勘探,2000,28(5):42—44.
- [9] 施龙青,宋振琪.采场底板突水条件及位置分析[J].煤田地质与勘探,1999,27(5):49—52.
- [10] 田文明,徐文泉,刘宝海等.五家矿含水砂层下提高回采标高的可行性[J].煤田地质与勘探,2002,30(3):47—48

## ·煤层气·

文章编号: 1001-1986(2004)03-0021-03

# 煤中显微组分的成烃演化实验

朱炎铭<sup>1</sup>, 秦 勇<sup>1</sup>, 张有生<sup>2</sup>, 夏筱红<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008;  
2. 国家计划委员会能源研究所, 北京 102206)

**摘要:** 热解模拟实验揭示, 镜质组的生烃作用与其起始成熟度有关, 如果初次生烃中止, 成熟度(再次生烃起始成熟度)尚未超过生油高峰阶段( $R=0.9\%$ ), 则再次生烃有可能显著提高煤的生烃潜力, 且以起始成熟度在生烃高峰处的升高幅度为最大。在有机显微组分中: 壳质组的生烃量最大, 生烃范围最集中; 镜质组次之; 惰质组最少。

**关键词:** 镜质组; 惰质组; 壳质组; 热解模拟实验

中图分类号: P618.11 文献标识码: A

## 1 引言

热解模拟实验揭示, 煤中不同的有机显微组分, 其生烃特征存在明显的差异, 同一有机质组分在不同的生烃阶段, 其生烃特征也存在明显的不同。

已有学者进行少量煤的热解生烃模拟, 得出了一些规律性的认识, 还有些学者对煤中有机组分甚至超微组分的生烃特征进行过研究, 并建立了不同有机组分的生烃模式<sup>[1~8]</sup>。但总体上这些研究的样品数量少, 且不够系统。本次研究采用自然系列成因煤样, 对煤的热解生烃性进行了深入的研究。

## 2 煤的热解模拟实验

在样品采集中主要考虑3个原则: a. 煤级分布; b. 选择华北晚古生界巨型聚煤盆地中带( $NE35^{\circ}30'$

$\sim 38^{\circ}30'$ 之间)下二叠统山西组煤样, 以降低煤层沉积背景和形成环境的影响(在华北中带, 山西组古地理景观主要为滨海平原, 煤层主要聚集于森林沼泽环境); c. 手选较为纯净的亮煤条带。遵循上述原则, 挑选了成熟度不同的10个煤样, 进行加工, 镜检表明样品基本为镜质组, 模拟结果可认为是煤中单组分——镜质组的生烃特征。(表1)

热解及热解模拟在法国 ROCK-EVAL II PLUS型仪器上进行, 样品以 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温速率连续升温, 测得 $200\sim600^{\circ}\text{C}$ 范围内间隔 $5^{\circ}\text{C}$ 的瞬时生烃量, 分析检测执行石油行标(SY117-86标准)。

## 3 镜质组热解生烃实验结果

### 3.1 热解生烃演化

实验结果显示, 煤中镜质组的起始成熟度处于

收稿日期: 2003-07-01

作者简介: 朱炎铭(1963—), 男, 江苏丹阳人, 中国矿业大学副教授, 博士。从事煤、油气地质和沉积学方面的研究。

## Numerical simulation of overlying strata and ground movement value induced by strip mining below thin bedrocks

YANG Wei-feng, SUI Wang-hua

(College of Mineral Resource and Geoscience, CUMT, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** This paper, through establishing a numerical simulation model, studied the damage mechanism of the overlying strata and the movement and deformation value of the ground subsidence and horizontal deformation induced by strip mining below thin bedrocks. The movement and deformation laws of the stress and displacement fields of the overburdening strata and ground are demonstrated. The conclusions provide a basis for the further research on the engineering geological mechanism of the overlying strata and ground movement and deformation induced by strip mining below thin bedrocks.

**Key words** thin bedrocks strip mining numerical simulation