

引用格式:于秋鸽,张华兴,邓伟男,等. 采煤引起的地表下沉形态非对称性分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2018, 37(4):42-48.

YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan, et al. The non-symmetric shape of surface subsidence caused by mining[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2018, 37(4):42-48.

# 采煤引起的地表下沉形态非对称性分析

于秋鸽<sup>1,2</sup>,张华兴<sup>1,2</sup>,邓伟男<sup>1,2</sup>,邹友平<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院,北京 100013;2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部,北京 100013)

**摘要:**大量现场实测表明,开采沉陷下沉盆地并不是关于采空区对称,而是开切眼一侧的地表下沉值普遍大于停采线一侧地表下沉值。为了分析地表下沉盆地非对称的原因,基于概率积分法地表下沉预计公式,将开切眼一侧的采动影响近似为多次重复采动,提出重复采动综合影响系数  $F$  概念,通过理论推导分析了地表下沉盆地非对称性产生的原因,并结合数值模拟和现场实例分析了重复采动综合影响系数  $F$  与采厚、采动程度之间的关系。研究表明: $F$  随采厚的增加而减小,但  $F$  值恒大于 0; $F$  随采动程度的增加而增加,当采动程度达到一定值时, $F$  值不再变化,但  $F$  值不再变化点不一定是由非充分采动到充分采动的过渡点。这对于合理解释某些特定地质条件下,地表下沉盆地的非对称性具有一定的借鉴意义。

**关键词:**概率积分法;下沉盆地;重复采动;综合影响系数;非对称性

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)04-0042-07

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.04.005

## The Non-symmetric Shape of Surface Subsidence Caused by Mining

YU Qiuge<sup>1,2</sup>, ZHANG Huaxing<sup>1,2</sup>, DENG Weinan<sup>1,2</sup>, ZOU Youping<sup>1,2</sup>

(1. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Co. Ltd, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Many engineering practices showed that the surface subsidence value wasn't symmetric above the gob, but that, the value on the open-off cut side was always greater than that on the stopping line side. To analyze the reasons of asymmetry, the mining moves on the open-off cut side was treated as repeated mining and the concept of repeated mining comprehensive influence coefficient  $F$  was put forward based on the probability integral method for surface subsidence prediction. At the same time, the reasons of asymmetry were analyzed by theoretical derivation and the relationships between  $F$  and mining height, between  $F$  and mining degree were analyzed by numerical simulation and field tests. The results show that  $F$  decreases with the increase of mining height, but it is always bigger than 0,  $F$  increases with mining degree and it does not change when the mining degree has reached certain value, but the value is not necessarily the point from subcritical mining to sufficient mining. This study is of great significance for analyzing the non-symmetry of surface subsidence in certain geological conditions.

**Key words:** probability integral method; subsidence basin; repeated mining; comprehensive influence coefficient; non-symmetry

收稿日期:2017-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51604151)

作者简介:于秋鸽(1989—),男,河南信阳人,博士研究生,从事矿山开采沉陷方面的研究. E-mail:418909128@qq.com

张华兴(1962—),男,浙江嵊州人,研究员,博士生导师,主要从事开采沉陷方面的研究.

E-mail:huaxingzhang@263.net

目前,国内在进行地表沉陷预计时普遍采用概率积分法,概率积分法就是把上覆岩层看成随机颗粒介质,随着工作面推进,随机颗粒介质移动的宏观形态与实际地表下沉形态相似,这也是概率积分法预计地表下沉在最终下沉值上与实际符合良好的主要原因<sup>[1]</sup>。但采用概率积分法进行地表下沉预计时,地表下沉在开切眼和停采线处的下沉值在理论上是相等的,地表下沉盆地形态是关于采空区中心对称分布的,而工程实践中,会出现开切眼上方地表下沉大于停采线上方地表下沉,采空区中心两侧地表下沉曲线不对称的情况。针对此现象,李永树等<sup>[2]</sup>认为这与工作面上覆岩层的初次垮落步距和周期垮落步距有关,但在岩层移动方面的解释忽略了产生此现象的原因为厚松散层的存在;刘义新等<sup>[3-4]</sup>在研究厚松散层开采条件下的地表沉陷规律时发现松散层在采动扰动情况下容易发生自身压缩现象。由此可见地表下沉形态与上覆岩层岩性密切相关。在工作面开采过程中,在某些特定采矿地质条件下(如垮落研石的重新压实、上覆岩层的弯曲下沉、松散层自身压缩等),开切眼一侧的采动影响就可以近似为重复采动。本研究应用概率积分法,引入重复采动综合影响系数  $F$  概念,推导出开切眼侧和停采线侧地表下沉值,解释了开切眼上方地表下沉量大于停采线一侧地表下沉量的原因。

### 1 地表下沉非对称性理论分析

由地表下沉的概率积分法可知,厚度为  $m$ 、宽度为  $dx$  的单元煤层开采造成的距离此单元体  $x$  水平距离的地表点的下沉值<sup>[5]</sup>为

$$dw(x) = \frac{1}{r} e^{-\frac{x^2}{r^2}} mq \cos\alpha dx \quad (1)$$

式中: $dw(x)$ 为单元煤层开采造成的地表下沉值; $r$ 为主要影响半径; $m$ 为煤层厚度; $q$ 为下沉系数; $\alpha$ 为煤层倾角; $dx$ 为单位开采宽度。

把工作面长度  $L$  进行  $2n$  等分,当  $n \rightarrow \infty$  时,每个小工作面开采宽度  $L/2n$  足够小,类似单元体宽度  $dx$ ,第一个单元体距离为开切眼的水平距离为  $x_1$ 、距离停采线的水平距离为  $x_{2n-1}$ ;第二个开采单元距离开切眼的水平距离为  $x_2$ 、距离停采线的水平距离为  $x_{2n-2}$ ;以此类推,第  $2n$  个开采单元距离开切眼的水平距离为  $x_{2n-1}$ 、距离停采线的水平距离为  $x_1$ ,如图 1 所示。

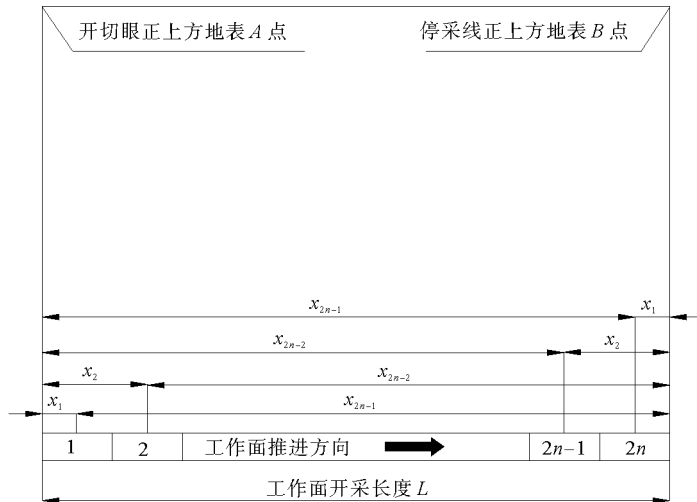


图 1 开采单元示意图

Fig. 1 The diagram of mining units

工作面从左往右推进,当上覆岩层容易受采动影响时,开采到第二个单元体时,由于第一个单元体已经开采,开采第 2 至  $2n$  个单元体开采的开切眼上方地表移动受类似于重复采动的影响,重复采动地表下沉值必然增加<sup>[6-7]</sup>,引入重复采动影响系数概念,用  $f_1, f_2, f_3 \dots f_{2n-1}$  表示,则开采第 1、2... $2n-1$ 、 $2n$  单元体造成

的开切眼正上方地表点 A 和停采线正上方地表点 B 的下沉值为:

$$\begin{cases}
 \text{第一单元开采,单元体两侧都为初次采动} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \omega_A^{(1)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_1^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha \\
 \omega_B^{(1)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-1}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha
 \end{aligned} \right. ; \\
 \text{第二单元开采,左侧为第一次重复采动,右侧为初次采动} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \omega_A^{(2)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_2^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_1) \\
 \omega_B^{(2)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-2}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha
 \end{aligned} \right. ; \\
 \text{第三单元开采,左侧为第二次重复采动,右侧为初次采动} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \omega_A^{(3)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_3^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_2) \\
 \omega_B^{(3)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-3}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha
 \end{aligned} \right. ; \\
 \vdots \\
 \text{第 } 2n-1 \text{ 单元开采,左侧为第 } 2n-2 \text{ 次重复采动,右侧为初次采动} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \omega_A^{(2n-1)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-2}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_{2n-2}) \\
 \omega_B^{(2n-1)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_2^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha
 \end{aligned} \right. ; \\
 \text{第 } 2n \text{ 单元开采,左侧为 } 2n-1 \text{ 次重复采动,右侧为初次采动} \\
 \left\{ \begin{aligned}
 \omega_A^{(2n)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-1}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_{2n-1}) \\
 \omega_B^{(2n)}(x) &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_1^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha
 \end{aligned} \right. .
 \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $W_A^{(1)}(x)$  为第一单元开采对开切眼地表造成的下沉;  $W_B^{(1)}(x)$  为第一单元开采对停采线地表造成的下沉;  $W_A^{(2)}(x)$  为第二单元开采对开切眼地表造成的下沉;  $W_B^{(2)}(x)$  为第二单元开采对停采线地表造成的下沉;  $L$  为工作面长度。

则整个工作面开采造成的开切眼正上方地表点 A 的下沉值为:

$$\begin{aligned}
 W_A &= \omega_A^{(1)}(x) + \omega_A^{(2)}(x) + \dots + \omega_A^{(2n-1)}(x) + \omega_A^{(2n)}(x) \\
 &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_1^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_2^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_1) + \dots + \\
 &\quad \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-2}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_{2n-2}) + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-1}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha (1 + f_{2n-1}) .
 \end{aligned} \tag{3}$$

由于单元体距离 A 点越来越远,单元体开采对 A 点的影响程度会越来越小。重复采动次数达到一定程度后,重复采动造成的地表下沉率将不会再发生变化,假设此时已开采到第  $m$  个单元体,则  $f_1 > f_2 > \dots > f_{m-1} = f_m = f_{m+1} = \dots = f_{2n-1} = 0$ 。

整个工作面开采造成的停采线正上方地表点 B 的下沉值为:

$$\begin{aligned}
 W_B &= \omega_B^{(1)}(x) + \omega_B^{(2)}(x) + \dots + \omega_B^{(2n-1)}(x) + \omega_B^{(2n)}(x) \\
 &= \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-1}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-2}^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha + \dots + \\
 &\quad \frac{1}{r} e^{-\frac{x_2^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_1^2}{\pi r^2}} \frac{L}{2n} mq \cos\alpha .
 \end{aligned} \tag{4}$$

联立式(3)、(4)可知:

$$\Delta W = W_A - W_B = \frac{1}{r} e^{-\frac{x_1^2}{r^2}} \frac{L}{2n} m q \cos a \times 0 + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_2^2}{r^2}} \frac{L}{2n} m q \cos a \times f_1 + \dots + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-2}^2}{r^2}} \frac{L}{2n} m q \cos a \times f_{2n-2} + \frac{1}{r} e^{-\frac{x_{2n-1}^2}{r^2}} \frac{L}{2n} m q \cos a \times f_{2n-1} \quad (5)$$

由于  $f_1, f_2 \dots f_{2n-1} \geq 0$ , 因此  $\Delta W > 0$ , 也就是说整个工作面开采以后, 开切眼正上方地表点 A 的下沉值大于停采线正上方地表点 B 的下沉值, 地表下沉曲线形态不是关于采空区中心对称, 而是整体偏向于开切眼侧, 同时  $\Delta W$  满足

$$\Delta W = W_A - W_B = W_B \times F \quad (6)$$

式中  $F$  表示重复采动综合影响系数。从而得到重复采动综合影响系数  $F$  满足:

$$F = \frac{W_A - W_B}{W_B} \quad (7)$$

在实际工程测量中, 经常受地表地形限制而无法使测点布置成直线状态, 如果已知地表在开切眼或者是停采线处的下沉值和重复采动综合影响系数  $F$ , 就可以求出另一侧的地表下沉值, 进而了解地表下沉曲线大致形态。因此如何求取重复采动综合影响系数  $F$  就显得很重要。

## 2 数值模拟分析

重复采动综合影响系数  $F$  是指开切眼上方地表受多次重复采动引起的地表下沉值和停采线上方地表下沉值之差与停采线上方地表下沉值的比值, 反映了工作面推进过程中对后部岩层的扰动程度的大小。当工作面上覆岩性以及顶底板管理方法一定时, 重复采动综合影响系数  $F$  主要取决于采动程度和煤层厚度。

数值模型利用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 依据芦沟煤矿 32101 工作面上覆岩层情况而建, 芦沟煤矿 32101 煤层属于豫西“三软”煤层, 工作面走向长 713 m, 倾斜长 113 m, 煤层平均厚度 4 m, 为近水平煤层, 工作面沿走向推进<sup>[8-9]</sup>。一般情况下, 在实验室测得的岩石参数都是岩块的, 工作面上覆岩层及其底板作为岩体存在, 其岩性参数总体上弱于实验室测得数据, 根据文献[10]研究成果对岩体参数进行弱化, 32101 工作面上覆岩层及岩性参数见表 1, 所建模型如图 2 所示。

表 1 32101 工作面上覆岩层及其底板岩层岩性及其参数

Tab. 1 Parameters of the overburden and floor strata in 32101 working face

岩性	厚度/m	内摩擦角/(°)	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	粘聚力/MPa	抗拉强度/MPa
黄土层	16	24	0.100	0.180	0.77	0.8
砂质泥岩	50	25	0.240	0.400	0.80	1.4
细粒砂岩	60	35	1.040	1.389	2.70	2.0
砂质泥岩	70	25	0.240	0.400	0.80	1.4
石灰岩	30	30	0.705	1.122	1.50	3.0
粉砂岩	20	30	1.500	2.500	2.80	4.0
泥岩	10	25	0.240	0.400	0.86	1.2
煤层	4	20	0.100	0.180	0.77	0.9
泥岩	10	25	0.240	0.400	0.86	1.2
粉砂岩	20	30	1.500	2.500	2.80	4.0

在模拟工作面推进时, 煤层每次开挖 10 m, 由于煤层开挖过程中, 上方地表移动变形尚未稳定, 根据文献[11], 通过调整时间步长来模拟地表动态下沉过程, 由于  $F$  是根据地表下沉稳定后的下沉值求得, 在最后一次开挖时, 让模型运行稳定。

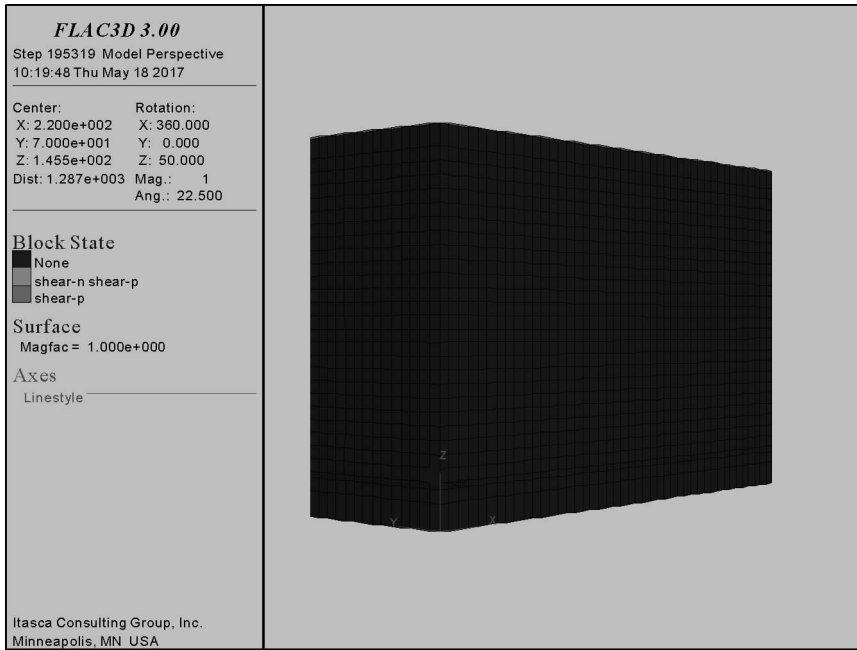


图 2 数值模型的建立

Fig. 2 The construction of numerical simulation model

### 2.1 F 与煤厚 M 之间关系

通过数值模拟分析了煤厚分别为 4、5、6、7、8、9 m 时  $F$  与煤厚  $M$  之间的关系,如图 3 所示。

由图 3 可知,重复采动综合影响系数  $F$  随着采厚的增大而减小。这是由于初次采动岩体碎胀量与深厚比成正比,重复采动的岩体碎胀量与初次采动的岩体碎胀量成反比<sup>[12]</sup>,说明采厚越大,初次采动的岩体碎胀量越小,重复采动岩体碎胀量越大,重复采动造成的地表下沉值越小,重复采动综合影响系数  $F$  值越小。

### 2.2 F 与采动程度之间关系

通过数值模拟分析了采动程度分别为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1、1.1、1.2、1.3、1.4 时,  $F$  与采动程度之间的关系(如图 4)。

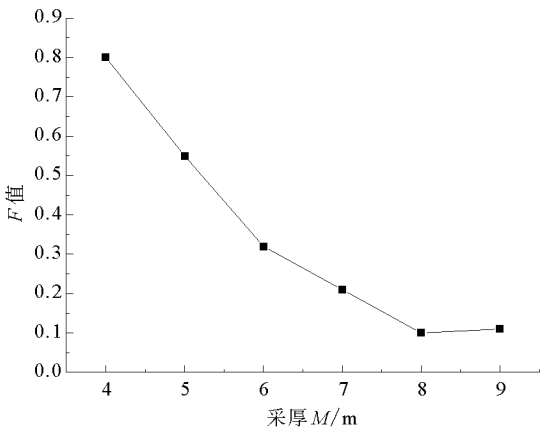


图 3 F 与采厚 M 之间的关系

Fig. 3 The relationship between  $F$  and mining height  $M$

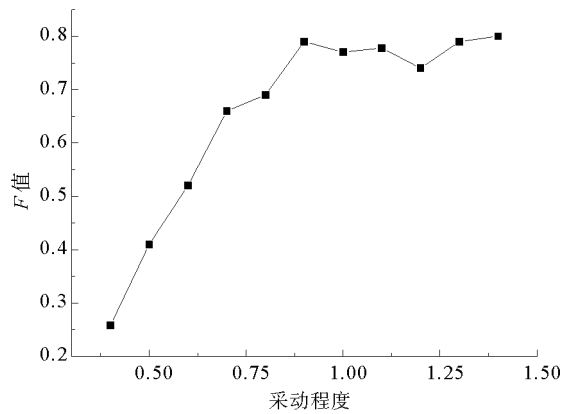


图 4 F 与采动程度之间的关系

Fig. 4 The relationship between  $F$  and mining degree

从图 4 可知:重复采动综合影响系数  $F$  随着采动程度的增加而逐渐增大,到达一定值后不再变化。重复采动综合影响系数  $F$  在开采初期随采动程度增加而增大是因为当工作面埋深一定时,采动程度越大,表示工作面推进长度越大,采动对后部岩层的扰动累积更多;当工作面推进到一定距离时,工作面离后部岩层

越来越远,采动对开切眼上覆岩层移动的影响也会越来越小,当工作面推进距离开切眼足够远时,对开切眼上覆岩层不再产生影响, $F$  值不再变化,值得注意的是  $F$  值不再变化点并不一定是由非充分采动到充分采动的过渡点。

### 3 实例验证

根据文献[2],邢台东庞煤矿 2102、2107、2108 工作面为厚松散层下开采,开采后的地表下沉实测数据如表 2 所示。

表 2 东庞煤矿实测数据

Tab. 2 The surveying results in Dongpang Colliery

工作面	采深/m	采厚/mm	$W_{max}/mm$	开切眼上方地表下沉值/mm	停采线上方地表下沉值/mm
2102	327	4 200	1 288	410	204
2108	316	2 400	1 551	245	99
2107	264	3 500	2 580	850	419

根据实测地表下沉值按公式(7)求出 2102、2107、2108 工作面的重复采动综合影响系数  $F$  分别为: 1.009、1.028、1.47。

重复采动综合影响系数  $F$  与煤层厚度之间的关系见图 5。采动程度与工作面的下沉系数紧密相关,随着采动程度的增加,下沉系数逐渐增大,工作面达到充分采动时,下沉系数不再增加<sup>[13-14]</sup>。2102、2107、2108 三个工作面的下沉系数分别为:0.3、0.65、0.74。根据  $n=K \times (L/H)$ ,  $n$  为采动程度系数; $K$  为小于 1 的系数,中硬岩层一般为 0.8; $L$  为工作面长度; $H$  为煤层埋深。当工作面上覆岩层按中硬岩层计算时,2102、2107、2108 工作面的采动程度系数分别近似为:0.375、0.812 5、0.925。重复采动影响系数  $F$  与采动程度之间的关系如图 6。

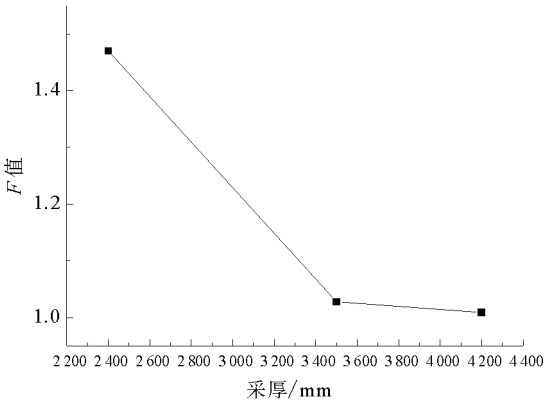


图 5  $F$  与采厚  $M$  之间的关系

Fig. 5 The relationship between  $F$  and mining height  $M$

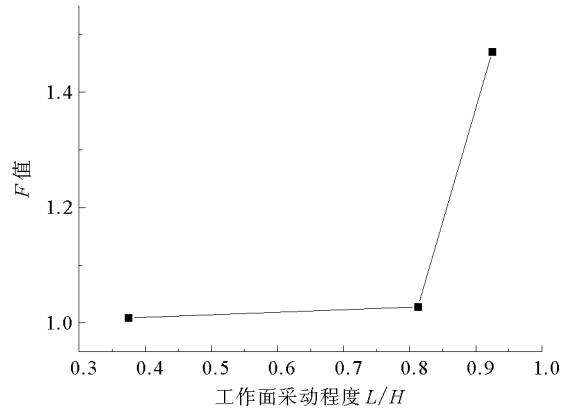


图 6  $F$  与采动程度之间的关系

Fig. 6 The relationship between  $F$  and mining degree

通过数值模拟分析了重复采动综合影响系数  $F$  与煤厚、采动程度之间的关系,并结合实例进行了验证,这对于分析采煤引起的地表下沉形态具有重要意义。地表整体下沉形态取决于地表各个点的下沉,本研究只针对开切眼和停采线上方地表点的下沉分析了地表整体下沉的形态,基于重复采动思想的地表下沉盆地模型还有待于进一步研究。

### 4 结论

1) 当工作面上覆岩层容易受采动影响时(如煤层埋藏较浅、工作面上覆岩层较软或者有厚松散层存在

等),煤层开采造成开切眼侧地表受多次重复采动影响,地表靠近开切眼一侧的下沉值大于停采线一侧的地表下沉值,地表下沉形态呈现非对称性。

2) 引入重复采动综合影响系数  $F$  的概念,得到开切眼上方地表下沉值、停采线上方地表下沉值和  $F$  之间的数值关系为: $F=(W_A-W_B)/W_B$ 。

3) 得到  $F$  与采厚、采动程度之间的关系为: $F$  随采厚的增加而减小,但是  $F$  值恒大于 0; $F$  随采动程度的增加而增加,当采动程度达到一定值时, $F$  值不再变化,但  $F$  值不再变化点不一定是由非充分采动到充分采动的过渡点。

#### 参考文献:

- [1] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2013:134-152.
- [2] 李永树,王金庄. 厚冲积层条件下开采沉陷盆地形态分析[J]. 测绘工程,1999,8(2):43-45.  
LI Yongshu, WANG Jinzhuang. An analysis on shapes of subsidence trough under thick alluvium[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 1999, 8(2): 43-45.
- [3] 刘义新,戴华阳,姜耀东. 厚松散层矿区采动岩土体移动规律模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(5):700-706.  
LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong. Model test for mining-induced movement law of rock and soil mass under thick unconsolidated layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(5): 700-706.
- [4] 刘义新,戴华阳,蒋耀东,等. 厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术,2013,41(5):117-121.  
LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong, et al. Study on surface movement law above underground deep mining under thick unconsolidated overburden strata[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 117-121.
- [5] 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,1991:205-230.
- [6] 邓喀中,谭志祥,张宏贞,等. 长壁老采空区残余沉降计算方法研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1601-1605.  
DENG Kazhong, TAN Zhixiang, ZHANG Hongzhen, et al. Research on calculating method of residual subsidence of longwall goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10): 1601-1605.
- [7] 卢正,邓喀中,靳永强. 长壁开采老采空区注浆充填范围确定方法[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(4):499-501.  
LU Zheng, DENG Kazhong, JIN Yongqiang. Determination of grouting filling area in goaf with longwall mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 499-501.
- [8] 于秋鹤. 芦沟煤矿水库下采煤安全性与地表移动破坏特征研究[D]. 焦作:河南理工大学,2016:63-69.
- [9] 于秋鹤,张华兴,邓伟男. 基于 Boltzmann 函数的地表动态下沉模型研究[J]. 煤矿开采,2017,22(3):52-54.  
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan. Study of surface dynamic subsidence model based on Boltzmann function[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(3): 52-54.
- [10] 王永秀,毛德兵,齐庆新. 数值模拟中煤层岩层物理力学参数确定的研究[J]. 煤炭学报,2003,28(6):593-597.  
WANG Yongxiu, MAO Debing, QI Qingxin. The research of physical and mechanics parameters in numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 593-597.
- [11] 刘吉波,廉旭刚,戴华阳,等. 基于 UDEC 的岩层与地表移动动态模拟研究[J]. 煤矿开采,2014,19(3):104-107.  
LIU Jibo, LIAN Xugang, DAI Huayang, et al. The dynamic research of earth surface movement based on UDEC[J]. Coal Mining, 2014, 19(3): 104-107.
- [12] 王悦汉,邓喀中,张东至,等. 重复采动条件下覆岩下沉特性研究[J]. 煤炭学报,1998,23(5):470-475.  
WANG Yuehan, DENG Kazhong, ZHANG Dongzhi, et al. The study on the character of strata subsidence during repeat mining[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(5): 470-475.
- [13] 戴华阳. 地表非连续变形机理与计算方法研究[J]. 煤炭学报,1995,20(6):614-618.  
DAI Huayang. Mechanism and calculation of surface discontinuous deformation[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(6): 614-618.
- [14] 陈俊杰,邹友峰,郭文兵. 厚松散层下下沉系数与采动程度关系研究[J]. 采矿安全与工程学报,2012,29(2):250-254.  
CHEN Junjie, ZOU Youfeng, GUO Wenbing. Study on the relationship between subsidence coefficient and mining degree under a thick alluvium stratum[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 250-254.