

# 矿区高强度开采地表损坏动态预测模型

闫伟涛,陈俊杰\*,柴华彬,颜少鸽

(河南理工大学测绘与国土信息工程学院,焦作 454003)

**摘要:**矿区地下资源的高强度开采势必引起耕地等地表附着物的严重破坏,尤以动态破坏影响较大。为对矿区高强度开采条件下地表动态损坏进行预测,该文首先通过相似模拟试验,揭示了高强度开采下覆岩和地表沿工作面推进方向周期性破坏的特征。然后,根据充分采动阶段的实测资料,检验分析了高强度开采地表下沉速度的右偏偏态分布规律,并总结了下沉速度动态分布的周期性,及其与工作面推进位置的相对位置关系。最后,据此构建了基于对数正态密度函数的地表损坏动态预测模型,并采用实例对预测模型的预测精度进行了验证,结果显示预测和实测曲线的决定系数在0.9以上,标准差与实测最大下沉速度值的比值小于7.0%,表明预测模型具有较高的精度,较为符合现场实际。研究结果可对类似条件矿区开采地表损坏动态预测提供指导。

**关键词:**模型;开采;地表损坏动态预测;下沉速度;偏态分布;对数正态密度函数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.033

中图分类号:TD327 文献标识码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0267-07

闫伟涛,陈俊杰,柴华彬,颜少鸽. 矿区高强度开采地表损坏动态预测模型[J]. 农业工程学报,2019,35(19): 267—273. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.033 <http://www.tcsae.org>

Yan Weitao, Chen Junjie, Chai Huabin, Yan Shaoge. Ground surface dynamic damage prediction model with high-strength mining in mining area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 267 — 273. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975 / j. issn. 1002-6819.2019.19.033 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

地下资源开采不可避免会引起地表沉陷,地表不同沉陷指标的大小都会影响到地表耕地、建(构)筑物等地表附着物的安全使用,如下沉易导致高潜水位地区地表积水,水平变形导致地表产生拉伸型裂缝或挤压型隆起,严重破坏原有耕地的土壤结构,造成耕地农作物减产甚至绝收,这种现象在矿区尤其严重<sup>[1-5]</sup>。根据矿区开采沉陷相关知识<sup>[6-8]</sup>,地表沉陷指标大致可分为两大类:静态指标和动态指标。静态指标主要包括下沉、水平移动等移动量和倾斜、曲率、水平变形等变形量,动态指标主要指静态指标在单位时间内的变化量,如下沉速度、水平移动速度等。目前,国内外学者对静态指标研究的较多,且取得了很多研究成果并得到了很好的实际应用<sup>[6-15]</sup>。但对于下沉速度等动态指标则研究的较少,且很多学者对下沉速度的研究是在下沉速度曲线符合正态分布这一假设的基础上进行的<sup>[6,8,16]</sup>。而现场实测资料发现,地表下沉速度曲线并不符合正态分布规律,采用正态分布函数构建下沉速度预测模

型将产生较大的预测偏差。这一问题在高强度开采条件下表现的更加突出。高强度开采的主要特征是开采深厚比小,宽深比大,推进速度快<sup>[4,15-17]</sup>。高强度开采地表和覆岩移动剧烈、破坏严重,地表下沉速度曲线偏态严重<sup>[18-27]</sup>。所以本文以高强度开采工作面为研究对象,选取下沉速度这一动态沉陷指标,分析地表下沉速度曲线形态和下沉速度的时空分布规律,并据此给出地表下沉速度的动态预测模型。研究结果可为充分开采阶段的地表动态剧烈损坏区域的确定及其修复时机的把握提供理论支持。

达到充分采动后,下沉速度达到该地质采矿条件下的最大值,工作面继续推进,下沉速度曲线形态基本保持不变,且曲线与工作面的相对位置基本不变,下沉速度曲线有规律的向前移动。而其他开采时段的下沉速度曲线分布则无此明显的规律性。所以本文仅对充分采动阶段的下沉速度曲线分布规律进行分析研究。

## 1 高强度开采地表下沉速度曲线形态实测分析

选取2407高强度开采工作面为研究对象。2407工作面地处陕北黄土高原与毛乌素沙漠的接壤地带,地表起伏不大且全部为风积砂所覆盖。工作面平均采深131 m,其中松散层42 m,煤层倾角 $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ,设计采高5.2 m,工作面走向长3 224 m,倾向长284 m,工作面推进速度约15 m/d。煤层结构简单,为稳定性煤层。上覆岩层为中硬偏硬岩层,老顶为粉细砂岩,直接顶为中细砂岩,直接底为砂质泥岩。采用全部垮落法管理顶板。在2407高强度开采工作面停

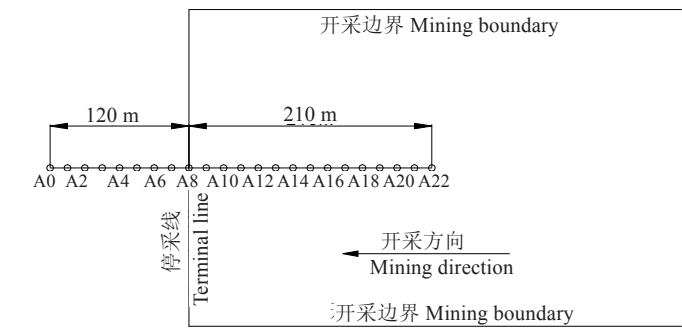
收稿日期:2019-02-29 修订日期:2019-06-20

基金项目:国家自然科学基金(No.41701597);河南省高校重点科研项目(No.20A440005);河南理工大学博士基金(B2019-3)

作者简介:闫伟涛,讲师,博士,主要从事矿山开采沉陷与矿山测量等方面的研究,Email:yanweitao@hpu.edu.cn

※通信作者:陈俊杰,教授,博士,主要从事矿山开采沉陷与矿山测量等方面的研究,Email:chenjj@hpu.edu.cn

采线一侧地表沿走向布设地表移动观测站,测点间距 15 m,采空区内、外观测线长分别为 210 m 和 120 m,如图 1。对观测站每隔一天测量一次。图 2 为获得的三期充分开采阶段的下沉速度数据。



注:A0-A22为监测点点号。  
Note: A0-A22 is the number of monitoring points.  
图 1 2407 工作面观测站布置示意图  
Fig.1 2407 face layout of ground station

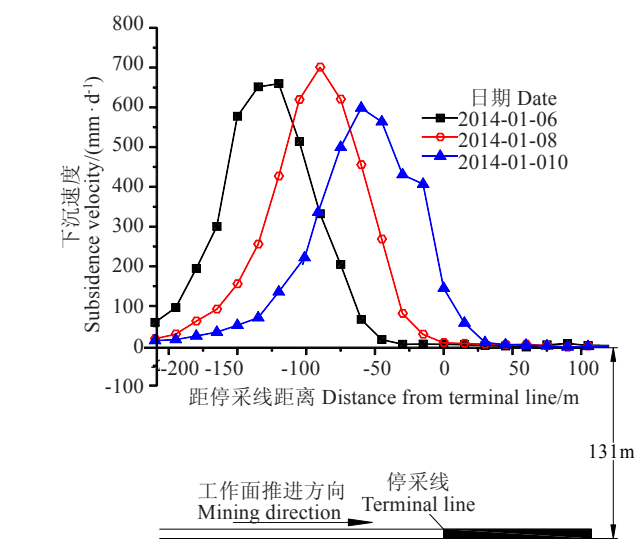


图 2 实测下沉速度曲线  
Fig.2 In-suit subsidence velocity curve

正态分布的峰度系数为 3.0,偏度系数为 0。峰度系数小于 3.0,则说明观测量集中度低;偏度系数越大,则说明分布的对称性越差;偏度系数大于 0 时,分布为右偏。对图 2 中的 3 期下沉速度曲线进行正态分布的适合度检验,结果显示下沉速度曲线的峰度系数介于 0.1~0.5 之间,偏度系数介于 1.1~1.2 之间,由此可知,下沉速度曲线为右偏偏态分布。结合工作面开采实际情况,可知下沉速度曲线偏向采空区一侧,即采空区侧下沉速度曲线较陡,工作面侧下沉速度曲线较缓。

2 高强度开采地表下沉速度时空分布规律的模拟分析

最大下沉速度往往滞后于工作面推进位置一段距离,滞后距离被称为最大下沉速度滞后距。但最大下沉速度滞后距是个几何概念,未能从沉陷机理上对滞后现象进行解释。所以本文通过对“地下开采—顶板冒落—覆岩破坏—地表沉陷”这一沉陷发育过程建立时空域上的井上下联系,来研究高强度开采下沉速度的时空分布规律。

2.1 模型的建立

本文参照 2407 工作面地质采矿条件,进行相似模型试验。模型架尺寸为 4 000 mm×300 mm×1 500 mm。根据相似理论,试验设计模型几何相似系数为 1:100,时间相似系数为 1:10,容重相似系数为 0.6,强度相似系数为 0.006。试验选用沙、碳酸钙、石膏和水为原料根据岩性选用对应的配比号制作模型。岩层各层选用的配比号见表 1。

根据神东矿区 2407 高强度开采工作面地质采矿条件进行相似模拟试验,对其覆岩破坏方式进行探讨。模型几何比例尺为 1:100,模型中煤层厚 5.39 cm,上覆岩层 131 cm,其中基岩 89 cm,松散层 42 cm。煤岩层水平铺设,每次开挖 15 cm。模拟开挖结束后覆岩破坏如图 1 所示。

表 1 模型相似材料配比及用量表

Table 1 Proportion and dosage of similar material for model

序号 No.	岩层名称 Layer Name	模型厚度 Thickness of stratum/cm	铺设层数 Numbers of laid layer	配比号 Mixture ratio	序号 No.	岩层名称 Layer Name	模型厚度 Thickness of stratum/cm	铺设层数 Numbers of laid layer	配比号 Mixture ratio
1	细粒砂岩	8	4	473	11	粉砂岩	2.0	2	546
2	粉砂岩	6	2	546	12	砂质泥岩	13.5	9	637
3	2-2 煤层	5.2	1	755	13	粉砂岩	5.0	5	546
4	粉砂岩	7.0	7	546	14	细粒砂岩	4.0	4	473
5	中粒砂岩	3.0	3	455	15	中粒砂岩	6.0	6	455
6	砂质泥岩	3.0	3	637	16	粉砂岩	4.0	4	546
7	细粒砂岩	6.0	6	473	17	砂质泥岩	5.0	5	637
8	中粒砂岩	5.0	5	455	18	沙砾石层	13.5	9	746
9	细粒砂岩	4.0	4	473	19	黄土	26.0	13	873
10	细粒砂岩	7.0	7	473	20	风积沙	16.0	8	982

2.2 下沉速度时空分布规律的分析

模型制作完风干后,进行模拟开挖。最终覆岩破坏形态如图 3 所示。

从图中可看出,基岩主要沿着基岩破断角方向发生全厚破断,松散层的破坏类型主要为剪切破坏,破坏方向为垂直向上。覆岩移动稳定后,停采线及开切眼处覆岩

破坏最外边界为两条近似直线的裂缝迹线,覆岩破坏主要发生于边界线之间,边界线和水平线之间在采空区一侧的夹角称为基岩破断角。图 3 说明,高强度开采基岩破坏沿基岩破断角方向向上发展,松散层破坏近似以垂直方向向上发育,直达地表,形成台阶型裂缝。模型试验测得工作面推进位置处基岩破断角为 54°~57°,取其平均值 56°。

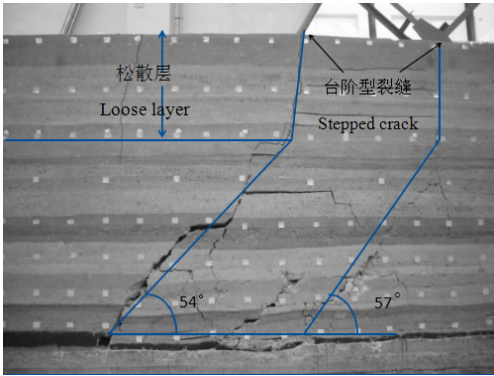


图 3 相似模拟试验覆岩破坏状态

Fig.3 Damage state of overlying strata after simulated excavation

地表台阶型裂缝的出现瞬间改变了原有地表下沉速度场的分布。高强度开采工作面的顶板垮落、地表台阶型裂缝发育和地表下沉速度分布的相关信息见表 2。

表 2 地表下沉速度空间分布规律分析  
Table 2 Spatial distribution law of surface subsidence velocity

下沉速度分布 Distribution of surface subsidence velocity	台阶型裂缝发育 Distribution of stepped crack	顶板周期性垮落 Periodic breakage of roof
最大下沉速度滞后距 57 m Lag distance of maximum subsidence velocity is 57m	台阶型裂缝滞后距 60 m	---
---	台阶型裂缝间距 8~11 m, 平均 10 m	周期来压步距 10 m

注：最大下沉速度滞后距和台阶型裂缝滞后距分别为最大下沉速度点和台阶型裂缝滞后于工作面推进位置的距离。  
Note: The lag distance of maximum subsidence velocity and the lag distance of stepped crack are the distance of the maximum subsidence velocity point and the stepped crack lag behind the advancing position of the working face, respectively.

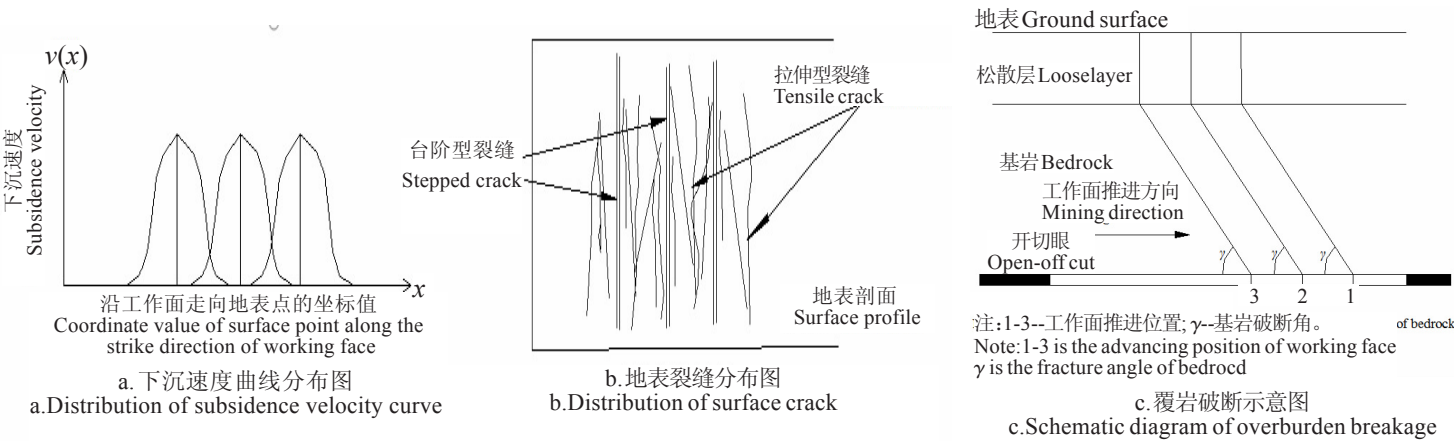


图 4 地表下沉速度动态分布与覆岩破断关系井上下对照图

Fig.4 Location map of relationship between surface dynamic subsidence distribution and overlying rock breaking

对数正态分布密度函数的极大值为：

$$f_{\max}(x)=\frac{\exp(\mu-\sigma^2/2)}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$
 (3)

均值为：

$$E=\exp(\mu+\sigma^2/2)$$
 (4)

通过对比式(3)和式(4)，可知，

$$f_{\max}(x)<E$$
 (5)

故对数正态分布密度函数的极大值小于均值，极大值在均值的左侧，所以对数正态分布密度函数为右偏态。

2)对数正态密度函数的归一性

对对数正态密度函数在 $(-\infty,+\infty)$ 进行积分,过程如下：

结合相似模拟实验，由表 3 可知，顶板垮落、覆岩破坏和地表下沉速度分布三者之间具有如下关系(如图 4)：

1)最大下沉速度位于台阶型裂缝处，二者的位置可由工作面推进位置和基岩破断角实时确定；

2)地表下沉速度动态分布具有周期性，且与顶板岩层垮落和台阶型裂缝的周期相同。

由上可知，最大下沉速度发生于台阶型裂缝处，二者的位置可由工作面推进位置和基岩破断角实时确定。所以高强度开采最大下沉速度滞后于工作面推进位置的距离可由式(1)计算。

$$L=H_j\cot\gamma$$
 (1)

式中： $L$ 为最大下沉速度滞后距，m； $H_j$ 为基岩厚度，m； $\gamma$ 为基岩破断角，°。

3 高强度开采地表损坏动态预测模型的建立

3.1 预测函数选择的合理性分析

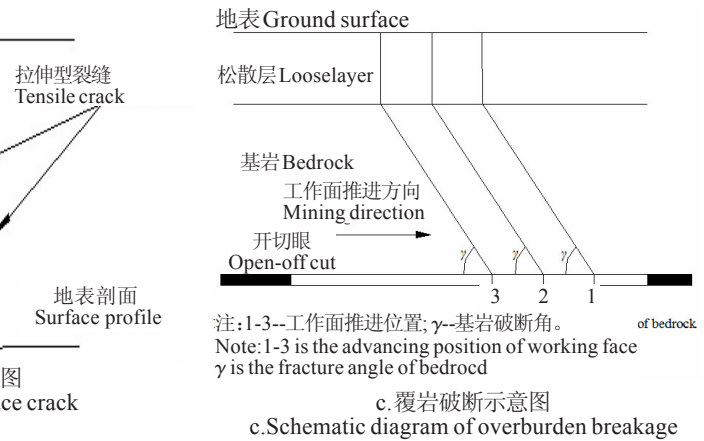
由上节可知，高强度开采下沉速度曲线符合右偏偏态分布规律，故选取的函数应满足以下两个条件：(1)右偏偏态性；(2)归一性。现分别对选取的对数正态密度函数进行分析。

1)对数正态分布密度函数的右偏偏态性<sup>[28]</sup>

对数正态分布密度函数表达式如下：

$$f(x)=\begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x}\exp\left[-\frac{(\ln x-u)^2}{2\sigma^2}\right] & x>0 \\ 0 & x\leq 0 \end{cases}$$
 (2)

式中： $x$ 为随机变量， $u$ 为 $\ln x$ 的期望值， $\sigma$ 为 $\ln x$ 的标准差。



注：1-3--工作面推进位置； $\gamma$ --基岩破断角。  
Note: 1-3 is the advancing position of working face  
 $\gamma$  is the fracture angle of bedrock

c.覆岩破断示意图  
c.Schematic diagram of overburden breakage

$$F(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x}\exp\left[-\frac{(\ln x-u)^2}{2\sigma^2}\right]dx$$
$$=\int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x}\exp\left[-\frac{(\ln x-u)^2}{2\sigma^2}\right]dx$$
$$=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^{+\infty} \exp\left[-\frac{(\ln x-u)^2}{2\sigma^2}\right]dx\left(\frac{\ln x-u}{2\sigma^2}\right)$$
 (6)

令 $z=\frac{\ln x-u}{2\sigma^2}$ ，则 $z\in(-\infty,+\infty)$ 。则上式可变为：

$$F(z)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-z^2}dz=1$$
 (7)

综上,对数正态密度函数满足右偏态性和归一性两个条件,故选取对数正态密度函数构建下沉速度动态预测模型具有一定的合理性。

3.2 地表损坏动态预测模型的构建

在无大地质构造和地表起伏存在的条件下,充分采动阶段各个时期的下沉速度曲线在形态、极值和与工作面的相对位置等方面都具有相似性。充分采动阶段内各个时期的下沉速度曲线可看作某一时刻的下沉速度曲线随工作面推进在工作面推进方向上的整体平移。平移量等于两个时刻最大下沉速度点之间的距离。设有如图5所示的坐标系。坐标原点位于开切眼正上方对应的地表点上,横坐标轴 $x$ 沿工作面推进方向布设,且沿工作面推进方向为正,纵坐标轴 $v(x)$ 竖直向上为正,代表横坐标为 $x$ 的地表点的下沉速度值。

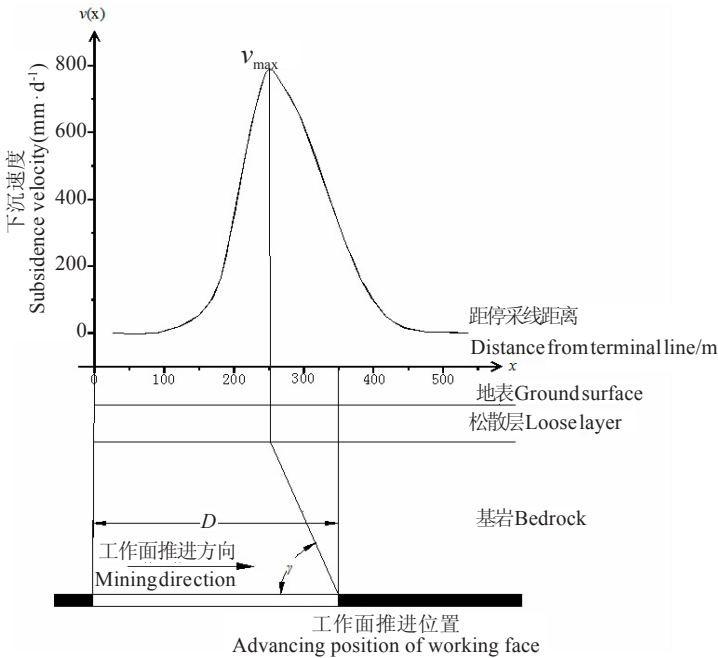


图5 坐标系的建立  
Fig.5 Establishment of coordinate system

最大下沉速度点在坐标系中的位置可由下式确定:

$$x_{vm}=D-H_j\cot\gamma$$
 (8)

式中: $D$ 为工作面推进距离, $m$ ;  $H_j$ 为基岩厚度, $m$ ;  $\gamma$ 为基岩破断角, $(^\circ)$ 。

两个时刻最大下沉速度点之间的距离 $d$ 可由下式计算:

$$d=x_{vm1}-x_{vm2}=D_1-D_2$$
 (9)

式中: $x_{vm1}$ 、 $x_{vm2}$ 分别为时刻1和时刻2最大下沉速度点离

开切眼的距离, $m$ ;  $D_1$ 、 $D_2$ 分别为时刻1和时刻2工作面的推进距离, $m$ 。则由式(9)可知,充分采动阶段任两个时刻最大下沉速度点之间的距离等于该段时间工作面的推进距离。

假设某一充分采动时刻获得工作面的下沉速度实测数据,通过拟合得出该时刻的下沉速度预测模型如下:

$$v(x)=\frac{p_1}{x}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-p_2}{p_3}\right)^2\right]$$
 (10)

式中: $v(x)$ 为横坐标为 $x$ 的地面点的下沉速度值, $mm/d$ ;  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 为模型参数。

自该时刻起,工作面又回采距离 $d$ 时的地表下沉速度预测模型如下:

$$v(x)=\frac{p_1}{x-d}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-p_2}{p_3}\right)^2\right]$$
 (11)

4 地表损坏动态预测模型的实例精度验证

4.1 实例一

以哈拉沟2407工作面为例,以2014年1月6日的地表实测下沉速度数据进行非线性曲线最小二乘拟合求取预测参数。得到的预测方程如下:

$$v(x)=\frac{2149100}{x}\exp(-0.5(\frac{\ln x-8.07}{0.01})^2)$$
 (12)

预测参数: $p_1=2149100$ ,  $p_2=8.07$ ,  $p_3=0.01$ 。

然后将预测参数带入预测模型式(11),对后续地表下沉速度进行预测。2014年1月8日和2014年1月10日两个时间点的预测与实测结果对比分析见图6和表3。

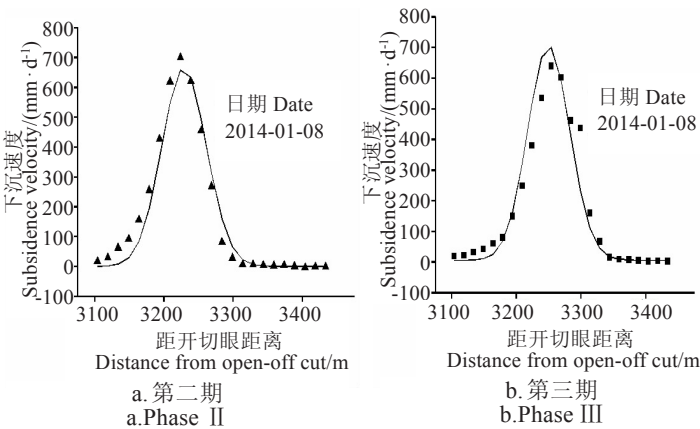


图6 不同日期的地表下沉速度曲线对数正态分布预测结果  
Fig.6 Logarithmic normal distribution fitting result of subsidence velocity with different time

表3 下沉速度预测效果  
Table 3 Fitting result of subsidence velocity

哈拉沟2407工作面 Halagou 2407 panel 2407 in Halagou coal mine			补连塔矿 Bulianta coal mine		
日期 Date	$R^2$	标准差与实测最大下沉速度值的比值 Ratio of standard deviation to measured maximum subsidence velocity/%	开采阶段 Mining stage	$R^2$	标准差与实测最大下沉速度值的比值 Ratio of standard deviation to measured maximum subsidence velocity/%
2014-01-08	0.98	3.3	开挖210 m时	0.91	4.1
2014-01-10	0.96	6.9	开挖300 m时	0.92	6.7
			开挖350 m时	0.91	5.6

4.2 实例二

选用相邻的补连塔矿某高强度开采工作面实测数据对模型进行应用分析<sup>[29-30]</sup>。工作面走向长3592 m,倾向

长300.5 m,煤层倾角 $1^\circ\sim 3^\circ$ ,采高4.5 m,平均采深200 m,上覆岩层岩性为中硬偏硬。采用综合机械化长壁开采方法进行开采,平均开采进度为12 m/d,完全垮落式方法管

理顶板。为进行岩移观测,在工作面开切眼一侧布设半条走向观测线,煤柱上方布设观测线长度380 m,采空区上方布设观测线长度500 m,测点间距为20 m(煤柱上方区域)和30 m(采空区上方区域)。选取走向观测线充分采动时期内工作面推进133、210、300和350 m四个时间点的地表下沉速度实测数据进行模型的应用分析。

采用工作面推进133 m时的实测数据非线性曲线拟

合求取预测参数,非线性拟合曲线拟合方程如下:

$$v(x) = \frac{105000}{x} \exp(-0.5(\frac{\ln x - 5.98}{0.07})^2) \quad (13)$$

拟合预测参数:  $p_1=105000$ ,  $p_2=5.98$ ,  $p_3=0.07$ 。

然后将预测参数带入预测模型式(11)对后续地表下沉速度进行预测。工作面推进210、300和350 m三个时间点的预测与实测结果对比分析见图7和表3。

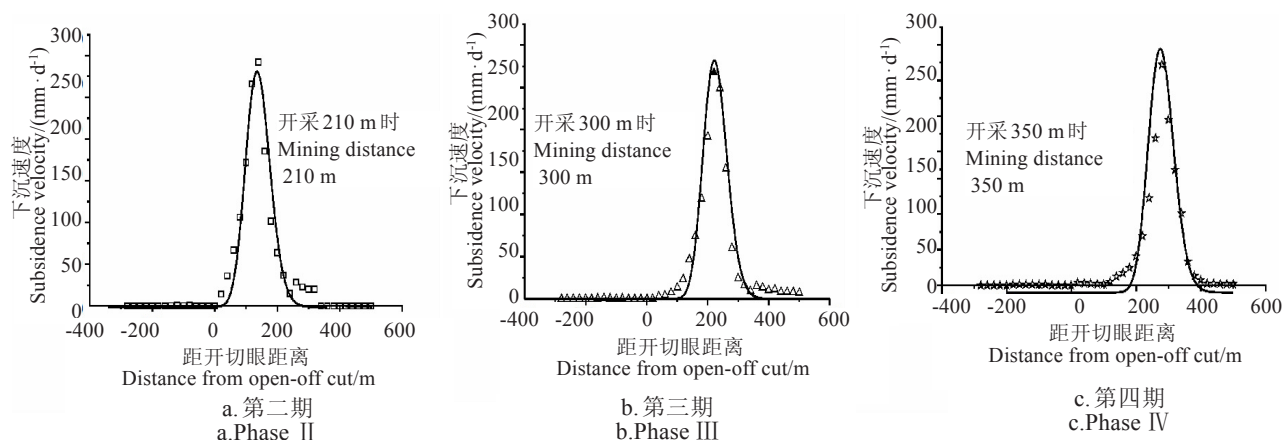


图7 不同推进距离时的地表下沉速度曲线对数正态分布预测结果

Fig.7 Logarithmic normal distribution fitting result of subsidence velocity with different advance distance of working face

由图6、图7和表3分析可知,采用对数正态模型预测时,预测和实测曲线的决定系数在0.9以上,标准差与实测最大下沉速度值的比值小于7.0%,说明对数正态密度函数适于建立下沉速度预测模型,且模型预测值与实测值相差较小,模型预测精度高,较为符合现场实际。

## 5 结 论

1)分析了高强度开采下沉速度曲线的偏态性。根据2407工作面走向主断面实测数据资料,总结了下沉速度曲线的右偏偏态分布规律。

2)揭示了高强度开采覆岩的破坏规律。高强度开采下,基岩沿基岩破断角方向发生全厚破断,松散层沿着垂直方向发生剪切破坏。

3)研究了下沉速度的时空分布规律。根据高强度开采工作面充分采动阶段的现场实测资料和相似模拟实验,综合分析了工作面开采地表下沉速度的动态分布特点:地表下沉速度动态分布具有与顶板岩层垮落和台阶型裂缝相同的周期性;最大下沉速度点位置可由工作面推进位置和基岩破断角实时确定。

4)建立了下沉速度的动态预测模型。采用对数正态密度函数构建了下沉速度动态预测模型。经实例验证,预测和实测曲线的决定系数在0.9以上,标准差与试测最大下沉速度值的比值小于7.0%,结果表明预测模型较为符合现场实际。

## 【参 考 文 献】

[1] 胡振琪,龙精华,张瑞娅,等. 中国东北多煤层老矿区采煤沉陷地损毁特征与复垦规划[J]. 农业工程学报,2017,33(05):238—247. Hu Zhenqi, Long Jinghua, Zhang Ruiya, et al. Damage characteristics and reclamation planning for coal-mining subsidence in old multiple seam mining area in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

the CSAE),2017,33(05):238—247. (in Chinese with English abstract)

[2] 陈朝,李妍均,邓南荣,等. 西南山区采煤塌陷对水田土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(18):276—285.

Chen Chao, Li Yanjun, Deng Nanrong, et al. Effect of coal mining subsidence on soil physical properties of rice field in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2014,30(18): 276—285. (in Chinese with English abstract)

[3] 臧荫桐,汪季,丁国栋,等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J]. 土壤学报,2010,47(02):262—269.

Zang Yintong, Wang Ji, Ding Guodong, et al. Variation of physico-chemical properties of Aeolian sandy soil at coal mining subsidence and its evaluation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(02): 262—269.

[4] 杜华栋,赵晓光,张勇,等. 榆神府覆沙矿区采煤塌陷地表层土壤理化性质演变[J]. 土壤,2017,49(04):770—775.

Du Huadong, Zhao Xiaoguang, Zhang Yong, et al. Evolution of topsoil physical-chemical properties after coal mining subsidence in Yu-Shen-Fu sand covered mining area[J]. Soils, 2017,49(04): 770—775.

[5] 王锐,马守臣,张合兵,等. 干旱区高强度开采地表裂缝对土壤微生物学特性和植物群落的影响[J]. 环境科学研究,2016,29(9):1249—1255.

Wang Rui, Ma Shouchen, Zhang Hebing, et al. Effects of surface cracks caused by high intensity coal mining on soil microbial characteristics and plant communities in arid regions[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(9): 1249—1255.

[6] 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.

[7] Peng S S. Coal Mine Ground Control[M]. New York: Wiley, 1987.

[8] 王金庄,邢安仕,吴立新. 矿山开采沉陷及其损害防治[M]. 北京:煤炭工业出版社,1995.

[9] 张子月,邹友峰,陈俊杰,等. 采煤塌陷区土地动态沉降预测模型[J]. 农业工程学报,2016,32(21):246—251.

Zhang Ziyue, Zou Youfeng, Chen Junjie, et al. Prediction model

- of land dynamic settlement in coal mining subsidence area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(21): 246—251. (in Chinese with English abstract)
- [10] Cui Ximin, Gao Yongge, Yuan Debao. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China[J]. Natural Hazards, 2014, 74, 911—929.
- [11] 张碧川. 榆神府黄土沟壑区煤层开采地表沉陷灾害分析及评价[D]. 西安:西安科技大学, 2018.
- Zhang Bichuan. Analysis and Evaluation of Coal Seam Mining Surface Subsidence Disaster in Loess Gully Region of Yushenfu [D]Xian: Xian University of Science and Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [12] 黄志安, 童海方, 张英华, 等. 采空区上覆岩层“三带”的界定准则和仿真确定[J]. 北京科技大学学报, 2006(07): 609—612.
- Huang Zhian, Tong Haifang, Zhang Yinghua, et al. Dividing guideline and emulating determination of “three zones” of the depressing zones overlying a goaf[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006(07): 609—612. (in Chinese with English abstract)
- [13] 马海涛, 贺红生, 付士根. 采空塌陷影响因素及稳定性分级方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008(05): 37—41.
- Ma Haitao, He Hongsheng, Fu Shigen. Study of factors and classifying method of goaf stability[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008(05): 37—41. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张长敏, 董贤哲, 祁丽华, 等. 采空区地面塌陷危险性两级模糊综合评判[J]. 地球与环境, 2005(S1): 99—103.
- Zhang Changmin, Dong Xianzhe, Qi Lihua, et al. Two stage fuzzy comprehensive evaluation on the risk degree of ground collapse in Mengcheng town[J]. Earth and Environment, 2005(S1): 99—103. (in Chinese with English abstract)
- [15] 谷小敏, 吴作启. 煤矿采动损害评价系统的建立及应用[J]. 煤矿开采, 2017, 22(04): 75—78.
- Gu Xiaomin, Wu Zuoqi. Building and application of mining damage evaluation system in coal mine[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(04): 75—78. (in Chinese with English abstract)
- [16] 康建荣, 王金庄, 温泽民. 采动覆岩动态下沉速度规律的相似模拟研究[J]. 太原理工大学学报, 2000(04): 364—366, 371.
- Kang Jianrong, Wang Jinzhuang, Wen Zemin. Analysis of dynamic subsidence of mining overburden strata[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2000(04): 364—366, 371. (in Chinese with English abstract)
- [17] 谭志祥, 王宗胜, 李运江, 等. 高强度综放开采地表沉陷规律实测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 59—62.
- Tan Zhixiang, Wang Zongsheng, Li Yunjiang, et al. Field research on ground subsidence rules of intensive fully mechanized mining by sublevel caving[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 59—62. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宣以琼. 薄基岩浅埋煤层覆岩破坏移动演化规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 512—516.
- Xuan Yiqiong. Research on movement and evolution law of breaking of overlying strata in shallow coal seam with a thin bedrock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 512—516. (in Chinese with English abstract)
- [19] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 196—201.
- Fan Gangwei, Zhang Dongsheng, Ma Liqiang. Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2): 196—201. (in Chinese with English abstract)
- [20] 彭永伟, 齐庆新, 李宏艳, 等. 高强度地下开采对岩体断裂带高度影响因素的数值模拟分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 145—149.
- Peng Yongwei, Qi Qingxin, Li Hongyan, et al. Numerical simulation and analysis on influencing factors of fractured zone height of high-strength mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 145—149. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yan Weitao, Dai Huayang, Chen Junjie. Surface crack and sand-inrush disaster induced by high-strength mining: example from the Shendong coal field, China[J]. Geosciences Journal, 2018, 22(2): 347—357.
- [22] Ju Jinfeng, Xu Jialin. Surface stepped subsidence related to top-coal caving longwall mining of extremely thick coal seam under shallow cover[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 78, 27—35.
- [23] 范立民, 张晓团, 向茂西, 等. 浅埋煤层高强度开采区地裂缝发育特征—以陕西榆神府矿区为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1442—1447.
- Fan Limin, Zhang Xiaotuan, Xiang Maoxi, et al. Characteristics of ground fissure development in high intensity mining area of shallow seam in Yushenfu coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1442—1447. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王双明, 黄庆享, 范立民, 等. 生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25] 闫伟涛. 浅埋深高强度开采地表移动变形规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- Yan Weitao. Research on Surface Movement and Deformation Rules of the Shallow Coal Seam With High Strength Mining [D]. Jiaozuo: Henan polytechnic university, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [26] 陈俊杰, 朱刘娟, 闫伟涛, 等. 高强度开采地表裂缝分布特征及形成机理分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(08): 96—100.
- Chen Junjie, Zhu Liujuan, Yan Weitao, et al. Analysis on distribution characteristic and formation mechanism of surface fissures caused by high intensity mining[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(08): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘辉, 何春桂, 邓喀中, 等. 开采引起地表塌陷型裂缝的形成机理分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(03): 380—384.
- Liu Hui, He Chungui, Deng Kazhong, et al. Analysis of forming mechanism of collapsing ground fissure caused by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(03): 380—384. (in Chinese with English abstract)
- [28] 韩春明. 对数正态分布密度函数有关参数的计算及其成因讨论[J]. 新疆工学院学报, 1997, 18(3): 222—234.
- Han Chunming. The computation of some parameter of logarithmic normal distribution density function and the discussion its genesis[J]. Journal of Xinjiang Institute of Technology, 1997, 18(3): 222—234. (in Chinese with English abstract)
- [29] Syd S. Peng, 李化敏, 周英, 等. 神东和准格尔矿区岩层控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [30] 王新静. 风沙区高强度开采土地损伤的监测及演变与自修复特征[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- Wang Xinjing. Monitoring Evolution and Self-healing Characteristic of Land Damage Due to High Tension Coal Mining in Windy and Sandy Area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2014. (in Chinese with English abstract)

## Ground surface dynamic damage prediction model with high-strength mining in mining area

Yan Weitao, Chen Junjie\*, Chai Huabin, Yan Shaoge

(*School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China*)

**Abstract:** China has the third largest coal reserves and the first coal consumption in the world. China's coal resource areas are highly coincident with major grain producing areas or ecologically fragile areas. Under high-intensity mining, overburden strata move violently and surface damage is serious. The large-scale exploitation of underground coal resources will inevitably cause the destruction of surface attachments such as cultivated land, and disturbance of ecological environment in mining area, which will seriously affect the sustainable development of mining area. The surface damage induced by high-intensity mining includes static damage and dynamic damage, but the dynamic damage is more serious. Surface subsidence velocity can reflect the severity of surface movement and deformation. So, in this paper, we chose subsidence velocity as the dynamic deformation index to reveal the dynamic development law of surface damage induced by high-intensity mining in mining area. First, we took the field observed data of ground movement observation station set on the side of terminal line of 2407 working area as an example, and selected several periods of data in the full mining stage as samples. Through the analysis of mathematical statistics, we concluded that the subsidence velocity curve has the distribution characteristics of right skewness. Second, we established a physical similarity model test according to the mining and geological conditions of 2407 working area. Combined with this experiment, we found that the average of bedrock break angle was  $56^\circ$ , which revealed the formation mechanism of stepped crack. Under high-intensity mining, the bedrock was full-thickness fractured along the break angle of bedrock, the main failure type of loose layer was shear failure and the direction of failure was upward in the vertical direction. When the failure reached the surface, the stepped crack appeared on the ground surface. According to the analysis of the measured data of 2407 working area, it was found that overlying strata and surface had the periodic failure characteristics along the advancing direction of working area under high-intensity mining, the period of roof caving was the same as that of stepped crack, and the maximum subsidence velocity was located at stepped crack. The position of maximum subsidence velocity can be determined by the break angle of bedrock in real time. Then, we selected the lognormal density function with right skewness and normality, and combined with the real-time location distribution characteristics of maximum surface subsidence velocity to construct the dynamic prediction model of subsidence velocity. The reliability of the dynamic prediction model was analyzed by selecting the field measured data of subsidence velocity from adjacent high-intensity mining working face of Bulian Tower coal mine. The results showed that the correlation coefficient between predicted data and measured data was over 0.9, and the ratio of standard deviation to measured maximum subsidence velocity was less than 7.0%. It showed the high reliability of the model. This research can provide guidance for dynamic prediction of mining subsidence in similar mining conditions.

**Keywords:** models; mining; ground surface dynamic damage prediction; subsidence velocity; skewness distribution; logarithmic normal density function