

侯得峰,许胜军,戚灵灵. 厚冲积层下开采地表动态移动规律及预计研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(1): 60-70. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2021.01.007

Hou Defeng, Xu Shengjun, Qi Lingling. Study on the law of dynamic surface movement and prediction of mining under thick alluvium[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(1): 60-70. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2021.01.007

## 厚冲积层下开采地表动态移动规律及预计研究

侯得峰<sup>1</sup>, 许胜军<sup>2</sup>, 戚灵灵<sup>3</sup>

1. 中国矿业大学(北京)能源与矿业学院, 北京 100083;
2. 河南理工大学矿业研究院, 河南焦作 454003;
3. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454003

**摘要:**为了研究厚松散层下开采地表动态沉降规律,以实测资料为基础,分析了地表动态移动参数随工作面回采的演化规律。结果表明:地表超前移动影响距和地表最大下沉速度及其滞后距随工作面开采距离的增加而增大;当工作面推进至350 m时,三个参数值增幅减小,并最终分别稳定于225 m、34.5 mm/d及124 m;此后,地表下沉速度曲线以固定形状与工作面保持一定距离向前移动。基于对国内部分厚松散层矿井开采案例多元统计分析,得到地表最大下沉速度及其滞后角正切值与地质采矿参数之间的经验关系式;结合地表动态移动参数演化规律,构建了工作面推进至任意时刻,地表走向主断面不同点处的下沉速度预计公式;通过与实测值进行对比,验证了其预计精度能够满足工程实践的需要。

**关键词:**厚冲积层;地表动态移动规律;多元线性回归;地表下沉速度预计

中图分类号:TD 327

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2021)01-0060-11

## Study on the law of dynamic surface movement and prediction of mining under thick alluvium

Hou Defeng<sup>1</sup>, Xu Shengjun<sup>2</sup>, Qi Lingling<sup>3</sup>

1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. Mining Research Institute, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China;
3. College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China

**Abstract:** In order to study the dynamic subsidence law of ground under thick alluvium, based on the measured data, the evolution law of the surface dynamic movement parameters with the working face advancing was analyzed. The results show that the influence distance of the advance movement of surface, the maximum subsidence velocity of surface and its lag distance increase with the increase of mining distance of the working face. When the working face advances to about 350 m, the increase of the three parameter values decreases and finally stabilizes at 225 m, 34.5 mm/d and 124 m, respectively, thereafter, the curve of surface subsidence velocity moves forward with fixed shape and lag distance from the working face; based on multiple statistical analysis of mining cases in some domestic thick loose layer mining areas, the empirical relations between the maximum surface subsidence velocity and the tangent of its lag angle with geological mining parameters were constructed; finally, combined with the evolution

收稿日期:2020-06-30 修回日期:2020-07-29

基金项目:国家自然科学基金青年基金(51704100)

作者简介:侯得峰(1988—),男,河南浚县人,博士研究生,主要从事岩层控制与特殊开采方面的研究工作。Tel:18811752600;  
E-mail:Defeng.Hou@hotmail.com

law of the surface dynamic movement parameters, the prediction formula of the subsidence velocity of different points on the main cross section of the ground strike with the working face advancing to any time was constructed. The comparison with the measured value shows that the predicted accuracy can meet the needs of engineering practice.

**Key words:** thick alluvium; law of ground dynamic subsidence; multiple linear regression; prediction of surface subsidence velocity

井下煤层开采引起的地表沉降变形是一个随时间及空间变化的复杂过程,回采过程中工作面与地表测点相对位置不同,开采对地表点的影响也就不同。因此,仅根据地表沉降稳定后的移动变形规律已不足以解决现场面临的开采沉降实际问题,通常还需要及时掌握地表随工作面回采的动态移动变形情况,以便对地表出现剧烈移动变形的区域及程度做出准确判断,进而为地表建(构)筑物的保护提供理论参考及技术支持<sup>[1-2]</sup>。

对于煤层开采引起的岩层及地表动态移动变形规律,国内外已有较为深入的研究。Knothe 时间函数模型最早被用于地表动态沉降预计中,而后众多学者对 Knothe 时间函数模型不断改进,并提出了适用性更好的时间函数模型<sup>[3-18]</sup>;黄乐亭等<sup>[19-21]</sup>依据井下煤层回采过程中地表点下沉速度的差异,将地表沉降过程划分为发展、充分和衰减 3 个不同的下沉阶段;李德海<sup>[22]</sup>基于大量岩移实测数据,分析了覆岩岩性对地表移动变形过程时间参数的影响,确定了时间参数与覆岩岩性参数及采深之间的关系式;邓喀中等<sup>[23]</sup>基于理论分析,推导出井下回采工作面推进至任意时刻,地表走向主断面任意点的下沉速度预计公式,但该预计公式仅在地表充分采动状态下适用,并不适用于工作面开采全过程。

现有针对厚松散层地质采矿条件下地表动态

移动变形情况的研究还较少,由于松散层的强度显著弱于基岩,使得采场覆岩整体岩性偏弱,采动影响下地表下沉系数接近于 1 甚至大于 1,地表移动变形范围大,动态移动剧烈。

本文基于红岭煤矿厚松散层工作面回采全过程地表沉降实测数据,首先,分析了工作面回采过程中地表最大下沉点及走向主断面动态移动相关参数(最大下沉速度及其滞后距、最大超前影响距)的变化规律;其次,分析了地表最大下沉速度及其滞后角正切值与地质采矿参数之间的相关性,并给出相关经验公式;最后,构建了工作面推进至任意时刻,地表走向主断面不同点处的下沉速度预计公式。本研究成果不仅对现场地表建(构)筑物的防护及治理提供技术依据,而且丰富了厚松散层下开采地表动态移动变形的理论研究。

## 1 工程概况

### 1.1 井田及工作面概况

河南煤化集团安阳鑫龙红岭煤矿主采山西组下部二<sub>1</sub>煤层,井田开采区域地表大部分为平整农田。1501 工作面为红岭煤矿 15 采区首个综放工作面,其上覆基岩层多为砂岩与砂质泥岩互层,松散层内部含水层和隔水层互相叠加沉积。工作面地质采矿技术参数见表 1。

表 1 1501 工作面地质采矿技术参数

Tab. 1 Geological and mining technical parameters of 1501 working face

走向/m	倾向/m	采厚/m	割煤/放煤 高度/m	推进速度/ (m·d <sup>-1</sup> )	煤层倾角/ (°)	埋深/m	基岩 厚/m	松散 层厚/m	地表下沉 系数	顶板控制
852	120	6.7	2.2/4.5	2.4	5.5	420	100	320	0.65	全部垮落法

### 1.2 地表移动观测站布置概况

为了研究工作面回采过程中地表移动变形规律,沿 1501 工作面地表走向与倾向布置两条观测线,如图 1 所示。走向观测线全长 1 650 m,共布置工作测点 81 个(Z<sub>1</sub>—Z<sub>81</sub>),倾向观测线全长 680 m,共布置工作测点 34 个(Q<sub>1</sub>—Q<sub>34</sub>),工作测点间距平均设定为 20 m。工作面从 2014 年 3

月 21 日开始回采,至 2015 年 5 月 19 日回采结束。观测时间从 2014 年 3 月 17 日进行首次观测,到 2016 年 2 月 18 日完成最后一次观测,且地表移动变形情况已基本稳定,平均每 14 d 进行一次全面观测。为方便分析地表移动变形规律,依据主断面投影法,将两条不规则布置观测线的测点观测数据分别投影到走向与倾向主断面上,最终分别得到走

向和倾向主断面上共计 35 次观测数据<sup>[24]</sup>。

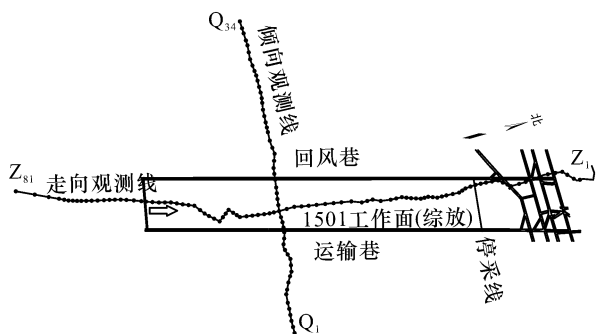


图1 地表移动观测站与工作面相对位置

Fig. 1 Layout of surface movement observation station

## 2 地表动态沉降变形实测分析

### 2.1 厚松散层下工作面采动程度分析

大量研究成果表明,工作面的采动程度除了受开采尺寸的影响之外,还与上覆地层的岩土比密切相关。松散层介质由于结构强度较小,在煤层开采过程中可看成散体介质随基岩同步协调变形,因此在分析地表开采的充分性时需要考虑一定的折减系数。由相关研究<sup>[25]</sup>可知,考虑松散层结构强度效应的开采充分性指标定义为

$$n = \frac{D}{H_0 - kH_s} \quad (1)$$

式中, $n$  为走向或倾向采动程度; $H_s$  为松散层平均厚度,m; $k$  为折减系数; $D$  为工作面倾向或走向开采长度,m; $H_0$  为工作面的平均采深,m。

参考红岭煤矿厚松散层条件下地表采动程度实测数据,统计分析得

$$n = \frac{D}{H_0 - (1 - \frac{0.28H_s}{H_0})H_s} \quad (2)$$

基于式(2),结合 1501 工作面采矿地质参数,计算得出工作面倾向采动程度  $n_1=0.39$ ,属于非充分采动状态;当工作面回采结束时,走向采动程度  $n_3=2.75$ ,属于超充分采动状态。在工作面由开切眼至回采结束的过程中,走向采动程度经历了极不充分→非充分→充分→超充分采动过程。

### 2.2 地表点动态沉降变化规律

地表移动持续时间是指地表最大下沉点在工作面回采过程中从沉降开始至结束所经历的时间。根据对地表建筑物的影响程度,将地表点下沉全过程划分为 3 个时期:起始期、活跃期和衰退期<sup>[26]</sup>。针对红岭煤矿松散层较厚、地表移动较为剧烈的特点,在活跃期内又定义地表点下沉速度  $v>10$  mm/d 为剧烈活跃期<sup>[26]</sup>。根据地表实测资料,分析了工作面推进过程中地表最大下沉点的下沉值和下沉速度变化特征,如图 2 所示。

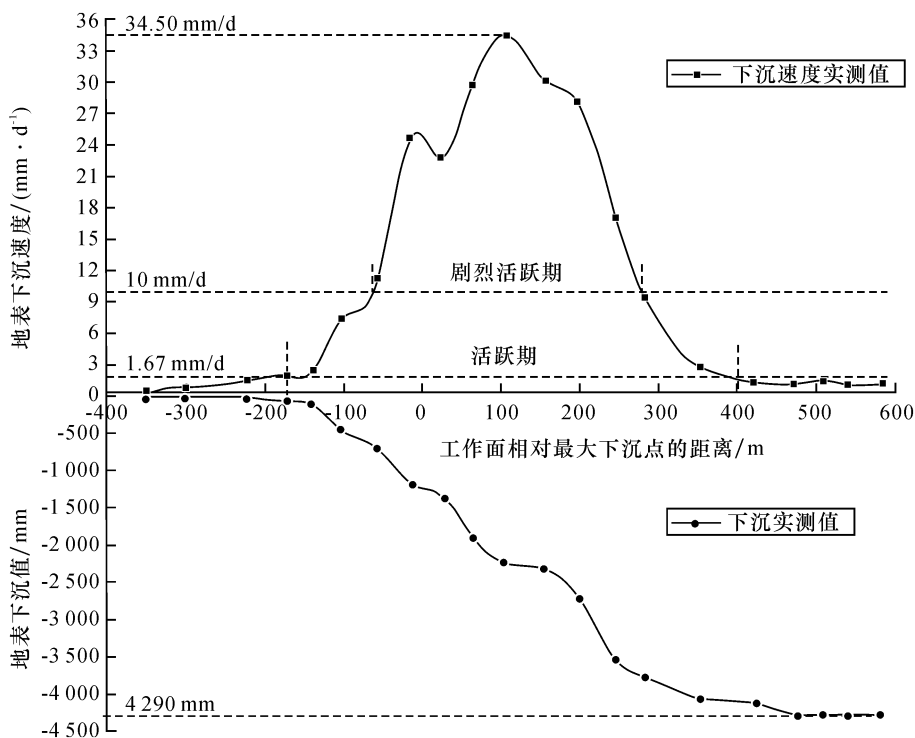


图2 工作面回采过程中地表最大下沉点的下沉值及下沉速度变化曲线

Fig. 2 The changing curve of subsidence value and sinking velocity of the maximum subsidence point during the mining process

由图2可以看出,随着工作面的不断推进,在距离地表最大下沉点约225 m时该点下沉值达到10.7 mm,表明工作面回采引起的地表超前移动影响距约为225 m;随着工作面继续向前推进,在距离地表最大下沉点约183 m时,该点下沉速度达到1.67 mm/d,表明地表点下沉由初始期进入活跃期;当工作面距离地表最大下沉点约65 m时,该点下沉速度达到10 mm/d,表明地表点下沉由活跃期过渡到剧烈活跃期;当工作面推进至地表最大下沉点正下方时,该点的下沉速度达到23.1 mm/d,约占最大下沉速度的67.0%;当工

作面推过地表最大下沉点约124 m时,该点下沉速度达到最大值34.5 mm/d,此时地表点移动最为剧烈,同时该点也基本上位于地表下沉曲线的拉伸变形与压缩变形的过渡区域,其对应的下沉值为2350 mm,约占地表最大下沉值的54.8%;当工作面推过地表最大下沉点约290 m时,地表点下沉剧烈活跃期结束;当工作面推过地表最大下沉点约400 m时,该点下沉速度重回1.67 mm/d,表明地表点下沉活跃期结束,进入衰退期。工作面推进过程中地表最大下沉点各时期移动持续时间及下沉量相关数据见表2。

表2 地表最大下沉点各时期移动持续时间及下沉量数据汇总

Tab.2 Data summary of movement duration and subsidence value of each period of the maximum subsidence point

移动持续阶段	工作面回采长度/m	持续时间/d	持续时间占总时间的比例/%	期间内地表下沉量/mm	期间下沉量占总下沉的比例/%
起始期	42	20	3.2	52	1.2
活跃期	583	243	39.4	3968	92.5
剧烈活跃期	355	148	24.0	3000	69.9
衰退期	26	354	57.4	270	6.3

由表2可知,相较于薄松散层矿井,红岭煤矿厚松散层综放开采引起的地表超前移动影响距明显偏大,地表移动初始期偏短,而活跃期及衰退期明显较长。分析原因,主要是由于工作面开采空间及强度较大,覆岩在工作面横向及纵向活动范围明显较大,同时,覆岩岩性整体偏弱,对下部开采扰动较为敏感,因此地表下沉的初始期较短;在工作面不断回采过程中,受采动影响松散层内大范围的失

水固结沉降,引起地表超前移动影响距较大。由于松散层内有多层含水层,受含水层内失水固结速度的影响,厚松散层矿井地表下沉盆地衰退期持续时间明显较长<sup>[27]</sup>。

2.3 地表动态沉降参数演化规律

通过分析地表观测数据,得出地表超前移动影响距、最大下沉速度及其滞后距随工作面回采的演化规律如图3所示。

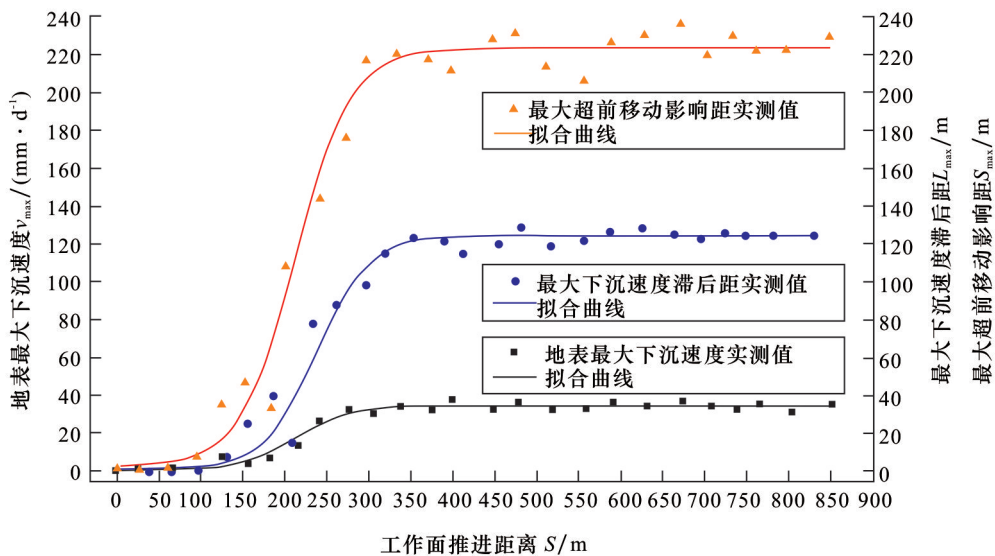


图3 地表动态沉降参数与工作面推进距离关系曲线

Fig.3 Relation curves between dynamic sinking parameters and the advancing distance of the working face

由图3可知,当工作面推进距离小于100 m时,由式(2)计算可知,此时地表走向方向采动程度 $n_3 \approx 0.32$ ,为极不充分采动阶段,此阶段内地表走向主断面各动态沉降参数值均无明显增长;当走向采动程度由极不充分过渡到非充分采动状态时,地表最大超前移动影响距由7.8 m迅速增大到39.8 m,增加约410.3%;同时,地表最大下沉速度及其滞后距也分别由1.72 mm/d和4.1 m迅速增大到7.23 mm/d和24.3 m,分别增加约320.3%和492.7%;随着工作面继续回采,动态沉降参数值均快速增加,当推进到350 m时,即走向采动程度逐渐接近充分采动状态时( $n_3 \approx 1.29$ ),各动态沉降参数值增幅逐渐减小,并最终分别稳定于225 m、34.5 mm/d和124 m,相应的最大下沉速度滞后角及超前移动影响角分别稳定于73.6°和61.9°。借鉴地表沉陷预计中的 Boltzman 预计模型<sup>[28]</sup>,通过对图3中各动态沉降参数值进行曲线拟合,拟合系数值 $R^2$ 平均达到0.84,得到拟合关系式:

$$A = a_1 + \frac{a_2}{1 + \exp\left(\frac{S - b_1}{b_2}\right)} \quad (3)$$

表3 厚松散层矿井地表动态移动变形参数

Tab.3 Ground dynamic movement and deformation parameters in thick loose layer mining areas

观测站	采深 $H_0/m$	松散层厚度 $H_s/m$	松散层 占比 $P$	推进速度 $v/(m \cdot d^{-1})$	采宽 $B/m$	宽深比 $E$	采厚 $M/m$	正切值 $\tan \varphi$	最大下沉速度 $v_{\max}/(mm \cdot d^{-1})$
赵固二矿 11011	690	612	0.88	5.4	180	0.26	3.50	4.60	22.0
赵固一矿 11011	489	440	0.90	3.2	180	0.37	3.50	1.96	24.5
顾北矿 1232	578	482	0.83	5.8	250	0.43	3.50	6.31	71.0
赵家寨 11206	313	120	0.38	2.0	170	0.54	6.54	4.10	51.0
谢桥矿 11118	500	400	0.80	1.9	162	0.32	3.00	-	13.6
范各庄矿区	346	105	0.30	1.7	178	0.51	7.40	-	26.9
张集矿 1141	530	388	0.73	5.0	212	0.4	3.00	4.83	51.0
平煤十二矿 15081	257	132	0.51	1.5	90	0.35	2.70	-	20.0
百善矿 675	208	145	0.70	1.0	175	0.84	2.10	-	14.0
杨村矿三采区	285	196	0.69	2.0	480	1.68	1.25	-	20.2
临涣矿 1042	383	245	0.64	5.6	55	0.14	3.00	-	0.73
王庄 6206	340	110	0.32	3.00	248	0.73	6.50	5.68	144.3
王庄 4326	238	127	0.53	3.80	274	1.15	6.65	3.49	209.7
司马 1101	248	155	0.63	4.10	165	0.67	6.65	3.52	241.0
高河 W1303	530	189	0.36	2.88	205	0.39	7.00	5.14	66.2
常村 S6-7	358	132	0.37	3.66	274	0.77	6.20	4.01	76.8
赵家寨 11206	313	120	0.38	3.00	170	0.54	6.54	4.35	51.0
东坡矿 914	265	50	0.19	2.77	240	0.91	14.4	1.67	389.4
红岭矿 1501	420	320	0.76	2.4	120	0.29	6.70	3.38	34.5
淮南矿首采面	528	440	0.83	6.5	205	0.39	3.30	11.43	53.1

式中, $A$ 为地表走向主断面动态沉降参数; $S$ 为工作面推进距离,m; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 和 $b_2$ 均为拟合参数值。

当 $A$ 为地表最大超前移动影响距 $S_{\max}$ 时, $a_1 = 223.7$ , $a_2 = -221.5$ , $b_1 = 212.8$ , $b_2 = 33.4$ ;当 $A$ 为地表最大下沉速度 $v_{\max}$ 时, $a_1 = 35.5$ , $a_2 = -35.1$ , $b_1 = 214.9$ , $b_2 = 34.4$ ;当 $A$ 为地表最大下沉速度滞后距 $L_{\max}$ 时, $a_1 = 124.4$ , $a_2 = -122.9$ , $b_1 = 213.9$ , $b_2 = 33.4$ 。

### 3 地表动态沉降参数回归分析

大量研究成果表明,影响地表动态沉降特性的地质采矿因素主要有:煤层埋深、采厚、工作面倾向宽度、基岩厚度、松散层厚度、工作面推进速度、开采方法等因素<sup>[29]</sup>。为了能够充分反映地质赋存及采矿技术因素对地表动态沉降相关参数的影响程度,为现场应用提供参考,现列举国内部分具有代表性的厚松散层矿井地表动态移动变形参数<sup>[25,29-37]</sup>,具体见表3。

通过对比分析得出地表最大下沉速度  $v_{\max}$  与各影响因子之间相关系数由大到小为  $H_0$ 、 $v$ 、 $M$ 、 $E$ 、 $P$ ;最大下沉速度滞后角正切值  $\tan \varphi$  与各影响因子之间相关系数由大到小为  $P$ 、 $v$ 、 $E$ 、 $H_0$ 、 $M$ 。为了简化应用,分别选取与地表动态沉降参数相关系数较高的前三个相关因素作为预测模型的自变量,通过对比分析,求得地表动态沉降参数的最优多元线性回归方程:

$$\tan \varphi = 21.01P - 1.37v + 12.18E - 11.13 \quad (4)$$

$$v_{\max} = 11.04v + 2.08M - 0.017H_0 + 10.19 \quad (5)$$

式(4)和式(5)在拟合求取过程中得出方差分别为 0.93 和 0.84,表明地表最大下沉速度滞后角正切值  $\tan \varphi$  和地表最大下沉速度  $v_{\max}$  预计公式的相关性显著,预计结果较为可靠。

由式(4)可看出,煤层埋深一定时,覆岩中松散层占比  $P$  越大(覆岩整体岩性越软),工作面开采宽度  $B$  越大,推进速度  $v$  越小时,地表最大下沉速度滞后距越小,其正切值也就越大。同理,由式(5)可知,煤层埋深  $H_0$  越小(开采扰动传递到地表时间越短),煤层采厚  $M$  越大,工作面推进速度  $v$  越快,地表最大下沉速度  $v_{\max}$  越大。由此,可根据地质采矿参数,通过回归公式来预计厚松散层覆盖地区地表动态移动变形参数,为现场生产活动提供简单有效的技术指导。

#### 4 地表点动态下沉预测

通过大量实测资料研究可知,随着工作面的不断回采,位于主断面上各测点的下沉速度整体上呈现正态分布或二次曲线形态<sup>[23]</sup>。若以井下工作面所对应的地表点为坐标原点  $O$ ,分别以工作面推进方向及地表下沉方向作为  $X$ 、 $Y$  轴正向,则可以表示出地表走向主断面下沉速度与工作面相对位置之间的关系<sup>[23]</sup>:

$$v(x) = \frac{v_{\max}}{1 + \left(\frac{x + L_{\max}}{a}\right)^2} \quad (6)$$

式中, $v(x)$  为地表走向主断面任意点下沉速度, mm/d;  $x$  为测点相对于工作面的距离, m;  $a$  为函数曲线形态参数;  $L_{\max}$  为地表走向主断面各时期最大下沉速度滞后距, m;  $v_{\max}$  为地表走向主断面各时期最大下沉速度, mm/d。

式(6)中  $v_{\max}$  及  $L_{\max}$  已由前文拟合分析得出,现主要分析函数曲线形态参数  $a$  的求解。假定地

表走向主断面某一测点在工作面距其很远处时开始下沉,并在工作面推过其下方很远处时下沉达到稳定值,则有

$$\Delta W = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{v_{\max}}{1 + \left(\frac{x + L_{\max}}{a}\right)^2} d\left(\frac{x}{v}\right) \quad (7)$$

求解可得

$$a = \frac{w_{\max}}{v_{\max}} \cdot \frac{v}{\pi} \quad (8)$$

$$w_{\max} = W_0 \sqrt{j n_1 n_3} \cos \alpha \quad (9)$$

式中, $v$  为工作面推进速度,取 2.4 m/d;  $v_{\max}$  可由式(3)中  $A$  取  $v_{\max}$  时确定;  $w_{\max}$  为地表最大下沉值, mm;  $W_0$  为地表充分采动条件下最大下沉值, mm;  $\alpha$  为煤层倾向;  $j$  为系数,一般取 2~3;  $n_1$ 、 $n_3$  分别为工作面倾向和走向方向采动程度系数。

$n_1$ 、 $n_3$  值可由式(10)确定:

$$\begin{cases} n_1 = \eta E \\ n_3 = \frac{\eta D}{H_0} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\eta$  为系数,一般可取 0.7~0.9;  $E$  为工作面宽深比;  $D$  为工作面走向开采距离, m;  $H_0$  为工作面平均采深, m。

由式(8)可知,在工作面推进速度一定时,地表走向主断面下沉速度曲线形态参数  $a$ ,随各时期最大下沉值及最大下沉速度的改变而不同。因此,在地表走向方向达到充分采动之前,地表走向主断面下沉速度曲线形态及最大下沉速度滞后距随工作面的不断推进而发生变化,其变化可由地表观测数据及工作面推进位置坐标而确定。图4为工作

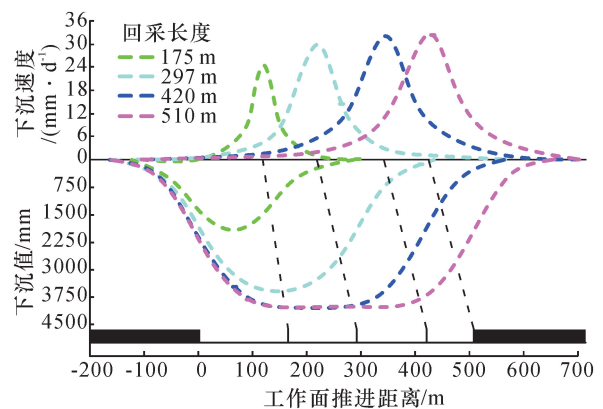


图4 不同回采距离地表走向主断面下沉值及下沉速度分布规律

Fig. 4 Distribution law of subsidence value and sinking velocity of the main section of strike at different mining distances

面推进距离分别为 175 m、297 m、420m 及 510 m 时地表走向主断面下沉值及下沉速度曲线分布规律。由图 4 可看出,随着工作面的不断推进,地表最大下沉速度及其滞后距逐渐增大,滞后角逐渐减小,下沉速度曲线逐渐变得平缓。结合地表观测数据可知,当工作面走向方向达到充分采动状态后,

随着工作面的继续推进,地表各动态移动参数基本保持不变。

结合红岭煤矿 1501 工作面的地质采矿参数,联立式(3)和式(8),并代入式(6),化简得到工作面回采至任意时刻地表走向主断面距工作面不同距离点处下沉速度预计公式:

$$v(x,t) = \frac{35.5 - 35.1(1 + A_1)^{-1}}{1 + \left\{ \frac{x + 124.4 - 122.9(1 + A_2)^{-1}}{vw_0 \sqrt{n_1 n_3} \cos \alpha} \cdot [35.5\pi - 35.1\pi(1 + A_1)^{-1}] \right\}^2} \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_1 = e^{\frac{t-214.9}{34.4}} \\ A_2 = e^{\frac{t-214.9}{34.4}} \end{cases} \quad (12)$$

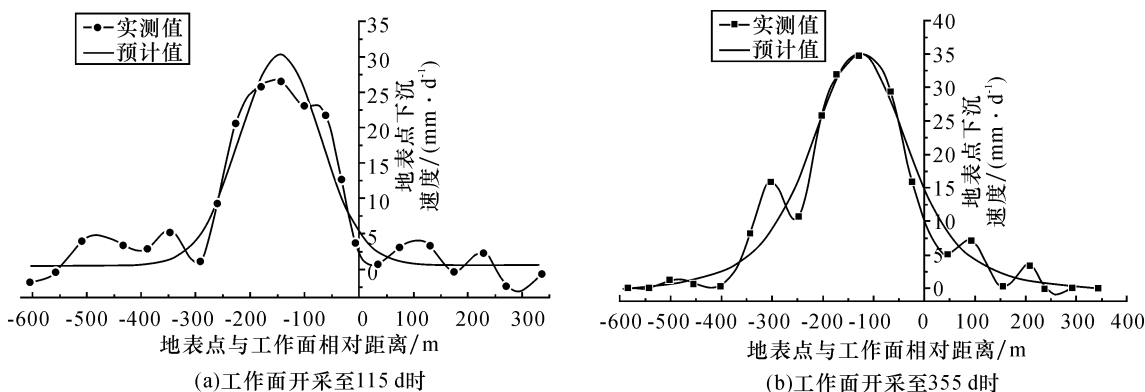


图5 工作面开采不同时间地表走向主断面不同点处下沉速度分布规律

Fig. 5 The distribution law of subsidence velocity at different points of the main section of the surface strike at different mining time

工作面开采 115 d 和 355 d 时,由式(11)计算得出地表走向主断面不同点处下沉速度分布情况,如图 5 所示。

由图 5 看出,位于钟形预计曲线两端测点的预计偏差较大,主要是因为这些区域本身距离工作面开采扰动剧烈区较远,地表移动变形较小,使得测量误差对结果影响较大。与充分采动条件下的预计偏差相比,非充分采动条件下预测误差明显较大,特别是图 5(a)钟形曲线左侧测点的实测值与预计值偏差最大。分析原因主要为:在非充分开采条件下,由于工作面开采空间有限,覆岩垮落运动在向上传导的过程中易形成稳定结构,但随着工作面开采尺寸的继续扩大,覆岩结构由下至上逐渐破断失稳,此过程造成工作面非充分开采状态下采空区后方岩层移动变形持续时间较长,从而使得图 5(a)钟形曲线左侧测点的实测值普遍大于预计值;当工作面进入到充分采动后,预计曲线整体上与实测值吻合较好。

为了量化上述预计结果,分别采用标准误差  $G$

与相对误差  $F$  对预计结果进行计算。计算结果见表 4,计算公式如下:

$$G = \pm \sqrt{\frac{[d \cdot d]}{n - 1}}$$

$$F = \frac{|G|}{v_{\max}} \times 100\%$$

式中, $d$  为预计值与实测值之差; $n$  为数据量; $v_{\max}$  为测点最大下沉速度值,mm/d。

由表 4 可知,当工作面分别推进到 115 d 及 355 d 时,其预计的标准误差分别为 3.9 和 2.7,相对误差分别为 14.6% 和 7.9%;当去除掉钟形曲线两端异常测点后,统计得到两个时刻相应测点的标准误差分别为 2.2 和 1.9,相对误差为 8.2% 和 5.5%,预计精度可以满足现场工程应用的要求,表明所建立的工作面推进至任意时刻地表走向主断面距工作面不同距离点处的下沉速度预计公式具有较好的适用性,可以为相似地质采矿条件下地表建(构)筑物的保护提供一定的理论指导及技术支持。

表4 工作面不同开采时间地表走向主断面不同点处下沉速度实测值与预计值对比

Tab. 4 Comparison of the actual measured value and the predicted value of the subsidence velocity at different points of the main section of the surface strike at different mining time

测点与工 作面的相 对距离/m	工作面开采至 115 d 时			测点与工 作面的相 对距离/m	工作面开采至 355 d 时		
	实测值/ (mm · d <sup>-1</sup> )	预计值/ (mm · d <sup>-1</sup> )	误差 (mm · d <sup>-1</sup> )		实测值/ (mm · d <sup>-1</sup> )	预计值/ (mm · d <sup>-1</sup> )	误差 (mm · d <sup>-1</sup> )
-602	-2.0	0.2	2.2	-597	0.0	0.1	0.1
-555	-0.7	0.2	0.9	-583	0.1	0.1	0.0
-507	4.0	0.2	-3.8	-542	0.1	0.2	0.1
-432	3.6	0.8	-2.8	-502	1.3	0.6	-0.7
-389	2.4	0.9	-1.5	-455	0.7	1.1	0.4
-341	5.7	1.9	-3.8	-403	0.4	2.5	2.1
-291	0.8	5.0	4.2	-342	8.2	5.1	-3.1
-260	9.5	9.1	-0.4	-302	16.0	8.5	-7.5
-227	20.8	17.1	-3.7	-246	10.8	16.5	5.7
-182	26.2	27.1	-0.1	-202	26.0	26	0.0
-141	26.8	30.2	3.4	-172	31.8	31.5	-0.3
-101	23.7	25.0	1.3	-128	34.5	35	0.5
-60	21.0	17.1	-3.9	-66	29.4	28	-1.4
-32	13.0	10.0	-3	-23	16.0	19	3.0
-6	3.9	6.3	2.4	47	5.3	8	2.7
35	0.8	1.8	1	93	7.0	4.1	-2.9
75	3.0	1.0	-2	157	0.2	2.1	1.9
131	3.1	0.8	-2.3	211	3.4	1.0	-2.4
174	-0.1	0.5	0.6	240	0.0	0.9	0.9
230	2.1	0.5	-1.6	292	0.0	0.2	0.2
271	-2.1	0.2	2.3	344	0.0	0.1	0.1
334	-0.4	0.2	0.6	360	0.0	0.1	0.1
标准误差 <i>G</i>			3.9	标准误差 <i>G</i>			2.7
相对误差 <i>F</i> /%			14.6	相对误差 <i>F</i> /%			7.9

## 5 结 论

(1) 厚松散层矿井综放开采引起的地表动态移动变形规律具有一定的特殊性,具体表现为:地表下沉的起始期较短,仅占总移动时间的 3.2%,阶段下沉量占总下沉量的 1.2%;活跃期与衰退期相对较长,分别占总移动时间的 39.4% 和 57.4%,阶段内下沉量分别占总下沉的 92.5% 及 6.3%。

(2) 地表走向主断面 3 个动态移动参数值(地表超前移动影响距、最大下沉速度和滞后距)随工作面不断回采而逐渐增大,增长速度表现出缓慢→快速→缓慢→稳定的演化规律;当工作面走向方向处于极不充分采动阶段时,3 个参数值随工作面回

采增长不明显;当由极不充分过渡到非充分采动时,3 个参数值突然增大,平均增加 381.1%;当工作面由非充分采动逐渐接近充分采动时,3 个参数曲线也由快速增长到逐渐趋缓,并最终分别稳定于 225 m、34.5 mm/d 和 124 m;当工作面开采达到充分采动状态后,地表最大下沉速度将以固定形状与工作面保持一定的滞后距向前迁移。

(3) 结合国内部分厚松散层矿井开采相关数据,通过综合分析煤层采厚、埋深、松散层占比、宽深比及工作面推进速度 5 个因素与地表最大下沉速度及其滞后角正切值之间的相关系数,并利用多元线性回归分析的方法得到厚松散层矿井地表最大下沉速度及其滞后角正切值的经验公式。

(4) 通过理论推导,构建了工作面推进至任意时刻地表走向主断面不同点处的下沉速度预计公式。该公式充分考虑了地表动态沉降相关参数随工作面回采的演化规律,提高了其在地表下沉速度预计方面的适用性及准确性。

## 参考文献

- [1] 唐君,王金安,王磊. 薄冲积层下开采地表动态移动规律与特征[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2958-2968, 3006.  
Tang Jun, Wang Jin'an, Wang Lei. Dynamic laws and characteristics of surface movement induced by mining under thin alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2958-2968, 3006.
- [2] 胡振琪,陈超. 风沙区井工煤炭开采对土地生态的影响及修复[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(2): 120-130.  
Hu Zhenqi, Chen Chao. Impact of underground coal mining on land ecology and its restoration in windy and sandy region[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2016, 1(2): 120-130.
- [3] 朱广轶,朱乐君,郭影. 地表沉陷动态时间函数研究[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(3): 329-332.  
Zhu Guangyi, Zhu Lejun, Guo Ying. Dynamic time function of mine subsidence[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(3): 329-332.
- [4] 张兵,崔希民,胡青峰. 开采沉陷动态预计的正态分布时间函数模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 140-145.  
Zhang Bing, Cui Ximin, Hu Qingfeng. Study on normal distributed time function model to dynamically predict mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 140-145.
- [5] 张兵,崔希民. 开采沉陷动态预计的分段 Knothe 时间函数模型优化[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 541-548.  
Zhang Bing, Cui Ximin. Optimization of segmented Knothe time function model for dynamic prediction of mining subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 541-548.
- [6] 许国胜,李德海,侯得峰,等. 厚松散层下开采地表动态移动变形规律实测及预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2056-2062.  
Xu Guosheng, Li Dehai, Hou Defeng, et al. Measurement and prediction of the transient surface movement and deformation induced by mining under thick alluvium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2056-2062.
- [7] 王小华,胡海峰,廉旭刚. 基于 Weibull 时间序列函数与负指数法的动态沉陷预计[J]. 金属矿山, 2015, 44(8): 158-162.  
Wang Xiaohua, Hu Haifeng, Lian Xugang. Dynamic subsidence prediction method based on negative exponential method and Weibull time sequence function[J]. Metal Mine, 2015, 44(8): 158-162.
- [8] 刘玉成,曹树刚,刘延保. 可描述地表沉陷动态过程的时间函数模型探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 925-931.  
Liu Yucheng, Cao Shugang, Liu Yanbao. Discussion on some time functions for describing dynamic course of surface subsidence due to mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 925-931.
- [9] 刘玉成,曹树刚,刘延保. 改进的 Konthe 地表沉陷时间函数模型[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 16-17.  
Liu Yucheng, Cao Shugang, Liu Yanbao. The improved Konthe time function for surface subsidence[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(5): 16-17.
- [10] 刘叶杰,常江,崔希民,等. 开采沉陷预计的样条概率积分法探讨[J]. 江苏煤炭, 1992, 17(1): 21-24.  
Liu Yejie, Chang Jiang, Cui Ximin, et al. Discussion on spline probability integral method for mining subsidence prediction[J]. Jiangsu Coal, 1992, 17(1): 21-24.
- [11] 刘文涛,贾喜荣. 开采沉陷动态预计流变模型及应用[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(4): 491-494.  
Liu Wentao, Jia Xirong. Rheological model of dynamic prediction on mining subsidence and its applications[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(4): 491-494.
- [12] 李春意,高永格,崔希民. 基于正态分布时间函数地表动态沉陷预测研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 108-116.  
Li Chunyi, Gao Yongge, Cui Ximin. Progressive subsidence prediction of ground surface based on the normal distribution time function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 108-116.
- [13] 胡青峰,崔希民,康新亮,等. Knothe 时间函数参数影响分析及其求参模型研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 122-126.  
Hu Qingfeng, Cui Ximin, Kang Xinliang, et al. Impact of parameter on Knothe time function and its calculation model[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 122-126.
- [14] 崔希民,缪协兴,金日平. 基于时间函数的地表移动动态过程计算方法[J]. 中国矿业, 1999, 8(6):

- 58-60.  
Cui Ximin, Miao Xiexing, Jin Riping. Time-based computation of surface movement process[J]. China Mining, 1999, 8(6):58-60.
- [15] 崔希民, 邓喀中. 煤矿开采沉陷预计理论与方法研究评述[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1):160-169.  
Cui Ximin, Deng Kazhong. Research review of predicting theory and method for coal mining subsidence[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):160-169.
- [16] 崔希民, 陈至达. 非线性几何场论在开采沉陷预测中的应用[J]. 岩土力学, 1997, 18(4):24-29.  
Cui Ximin, Chen Zhida. The application of nonlinear geometric field in mining subsidence[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(4):24-29.
- [17] 常占强, 王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究——改进的克诺特时间函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9):1496-1499.  
Chang Zhanqiang, Wang Jinzhuang. Study on time function of surface subsidence: the improved Knothe time function[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9):1496-1499.
- [18] 刘波, 杨伟红. 考虑时间效应的隧道开挖三维沉降预测模型及应用[J]. 矿业科学学报, 2019, 4(5):384-393.  
Liu Bo, Yang Weihong. Prediction model and application of three-dimensional ground surface settlement induced by tunnel excavation considering time effect[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(5):384-393.
- [19] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形的3个阶段与变形速度的研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(4):420-424.  
Huang Leting, Wang Jinzhuang. Study on the three stages and deformation velocity of dynamic surface subsidence deformation[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4):420-424.
- [20] 黄乐亭. 地表动态沉陷变形的三个阶段与规律[J]. 矿山测量, 2003(3):18-20.  
Huang Leting. Research on three stages and law of dynamic surface subsidence and deformation[J]. Mine Surveying, 2003(3):18-20.
- [21] 黄乐亭, 王金庄. 地表动态沉陷变形规律与计算方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2):211-215.  
Huang Leting, Wang Jinzhuang. Research on laws and computational methods of dynamic surface subsidence deformation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2):211-215.
- [22] 李德海. 开采工作面推进度对地表变形速度的影响[J]. 焦作矿业学院学报, 1993, 12(1):64-74.  
Li Dehai. Effects of the progress of the working front upon the rate of deformations of the surface area[J]. Journal of Jiaozuo Mining Institute, 1993, 12(1):64-74.
- [23] 邓喀中, 王金庄, 邢安仕. 采动过程中地表任意点下沉速度计算[J]. 中国矿业学院学报, 1983, 12(4):71-82.  
Deng Kazhong, Wang Jinzhuang, Xing Anshi. On predicting the surface subsidence velocity in undermining process[J]. Journal of China Mining Institute, 1983, 12(4):71-82.
- [24] 孙绍先. 折线和斜线观测站的数据处理[J]. 矿山测量, 1983(1):23-25.  
Sun Shaoxian. Data processing of polyline and slash line observation station[J]. Mine Surveying, 1983(1):23-25.
- [25] 张鲜妮, 王磊. 巨厚松散层薄基岩煤层开采沉陷规律实测研究[J]. 矿业安全与环保, 2015, 42(5):50-53.  
Zhang Xianni, Wang Lei. Study on mining subsidence law of coal seam with extra-thick loose-bed thin bedrock by measurement[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(5):50-53.
- [26] 王金庄, 李永树, 周雄, 等. 巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1):20-23.  
Wang Jinzhuang, Li Yongshu, Zhou Xiong. Ground movement caused by mining under thick alluvium[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(1):20-23.
- [27] 李文平, 于双忠. 徐淮矿区深部土体工程地质特性及失水变形机理[J]. 煤炭学报, 1997, 22(4):21-26.  
Li Wenping, Yu Shuangzhong. Engineering geological characteristics and mechanism of deformation due to water loss of the soil mass at depths in Xuhuai mine area[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4):21-26.
- [28] 李培现. 深部开采地表沉陷规律及预测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2012.
- [29] 许国胜, 张彦宾, 李德海, 等. 厚松散层下开采地表动态移动参数研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5):70-73.  
Xu Guosheng, Zhang Yanbin, Li Dehai, et al. Study on surface dynamic subsidence and deformation parameters in area covered with thick alluvium[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(5):70-73.
- [30] 郑志刚, 滕永海. 厚松散层综放开采条件下地表岩

- 移参数分析[J]. 煤矿开采, 2016, 21(2): 22-25.
- Zheng Zhigang, Teng Yonghai. Ground surface rock strata movement parameters of thick loose strata with fully mechanized top coal caving [J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(2): 22-25.
- [31] 张俊义. 夏店煤矿厚煤层综放开采地表移动变形规律研究[J]. 矿山测量, 2016, 44(3): 27-29.
- Zhang Junyi. Study on ground movement and deformation of thick seam mined by fully mechanized sublevel caving in Xiadian Mine [J]. Mine Surveying, 2016, 44(3): 27-29.
- [32] 郭文兵, 黄成飞, 陈俊杰. 厚煤层综放开采地表下沉速度观测研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(4): 114-117.
- Guo Wenbing, Huang Chengfei, Chen Junjie. Observation and study on surface ground subsidence speed of fully mechanized top coal caving mining in thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(4): 114-117.
- [33] 高超, 徐乃忠, 刘贵, 等. 特厚煤层综放开采地表沉降规律实测研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(12): 106-109.
- Gao Chao, Xu Naizhong, Liu Gui, et al. Research on actual measurement of surface subsidence law for fully-mechanized top coal caving in extra thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(12): 106-109.
- [34] 刘义新, 戴华阳, 姜耀东, 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): 117-120.
- 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): 117-120.
- [35] 郭文兵, 黄成飞, 陈俊杰. 厚湿陷黄土层下综放开采动态地表移动特征[J]. 煤炭学报, 2010, 35(S1): 38-43.
- Guo Wenbing, Huang Chengfei, Chen Junjie. The dynamic surface movement characteristics of fully mechanized caving mining under thick hydrous collapsed loose [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 38-43.
- [36] 朱卫兵, 许家林, 李兴尚, 等. 厚表土层薄基岩条件下村庄压煤条带开采试验[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 738-742.
- Zhu Weibing, Xu Jialin, Li Xingshang, et al. Experimental research on strip mining under village in the condition of thick alluvium and thin bedrocks [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6): 738-742.
- [37] 侯得峰, 李德海, 许国胜, 等. 厚松散层下采高对地表动态沉降特征的影响[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 191-196.
- Hou Defeng, Li Dehai, Xu Guosheng, et al. Impact of mining thickness on dynamic subsidence characteristics in condition of mining under thick unconsolidated layers [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 191-196.

(责任编辑: 王晓玲)