



移动扫码阅读

高永格,牛 鑫,张 强,等.厚松散层下采煤地表沉陷特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6):192–198.

doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.029

GAO Yongge, NIU Chu, ZHANG Qiang, et al. Study on surface subsidence characteristics of coal mining under thick loose layer[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 192–198. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.029

## 厚松散层下采煤地表沉陷特征研究

高永格,牛 鑫,张 强,张 开

(河北工程大学 矿业与测绘工程学院,河北 邯郸 056038)

**摘 要:**为掌握地表沉陷的一般变形规律,需研究厚松散层下采煤地表沉陷终态变形特征和地表沉陷动态变形特征,对云驾岭矿三采区开展了系统的地表沉陷监测,分析研究了地表沉陷终态移动变形特征及角量参数求取,地表下沉速度,地表下沉速度滞后和地表移动延续时间。研究结果表明:地表沉陷范围广,充分采动角为:走向左 $70^{\circ}$ 、走向右 $61^{\circ}$ 、走向边界角 $57^{\circ}$ 、下山边界角 $81^{\circ}$ 、走向移动角 $67^{\circ}$ ,下沉速度快,下沉活跃阶段仅为15 d,占整个地表移动时间的6%,最大下沉速度滞后距分别为146 m和143 m,衰退阶段下沉量小,但周期较长,上述结果验证了厚松散层下重复采动时,地表下沉与采动程度呈正比,活跃期的下沉周期短,衰退阶段周期长等特征。

**关键词:**厚松散层;地表沉陷;动态沉陷特征;终态沉陷特征

中图分类号:TD325.4

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)06-0192-07

## Study on surface subsidence characteristics of coal mining under thick loose layer

GAO Yongge, NIU Chu, ZHANG Qiang, ZHANG Kai

(School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on the general deformation law of surface subsidence, the characteristics of the final deformation of the surface subsidence and the dynamic deformation characteristics of the surface subsidence under the thick loose layers were studied, and the systematic surface subsidence monitoring was carried out in the third mining area of Yunjialing Mine, and the characteristics of the final movement and deformation of the surface subsidence, the calculation of the angular parameters, the subsidence rate of the ground surface, the velocity of ground subsidence and the duration of ground movement were analyzed and studied. The results show that the subsidence area is wide, and the full mining angle is  $70^{\circ}$  to the left,  $61^{\circ}$  to the right,  $57^{\circ}$  to the boundary angle,  $81^{\circ}$  to the lower boundary angle, and the strike angle is  $67^{\circ}$ . The sinking speed is fast and the active phase is only 15 days, accounting for 6% of the total surface movement time. The maximum subsidence velocity lag distance is 146 m and 143 m respectively, and the subsidence amount is smaller but the cycle is longer in the recession stage. The above results show that when the mining is repeated under thick loose layer, the subsidence of the ground surface is directly proportional to the degree of mining, the subsidence period of active period is short, and the period of the decline stage is long.

**Key words:** thick loose layer; surface subsidence; dynamic deformation characteristics; terminal subsidence characteristics

## 0 引 言

矿山开采尤其是煤炭开采所产生的问题由来已久,在不同地质采矿条件下的煤炭开采所诱发的一系列开采沉陷问题复杂多变,引起了世界各采煤国家科研工作者的关注,并为之从各个方面开展研究工作<sup>[1-3]</sup>。开采沉陷问题中最为突出的当属厚松散层下煤层的大面积采动,既会产生地表沉陷规模、沉陷量和沉陷位置在时间和空间上的预计难度

的增加<sup>[4-5]</sup>,同时也会带来对上覆岩层的断裂场、位移场和应力场的发育特征及其发育规律的影响<sup>[6]</sup>。从煤矿区地层结构看,我国厚松散层矿区分布广泛,在东北、华北、华中矿区均存在不同厚度的松散层<sup>[7]</sup>,而上述矿区既是我国的主要煤炭生产基地,又存在“三下”压煤开采、覆岩导水裂隙带发育高度科学预测、巷道围岩-充填体变形支护问题<sup>[8-10]</sup>。为了将我国的“三下”压煤更好地解放出来,故更需要科学、严谨地分析厚松散层下开采地表沉陷特征

收稿日期:2018-12-12;责任编辑:曾康生

作者简介:高永格(1969—),男,河北元氏人,教授,博士。E-mail:1023593234@qq.com

和规律,同时也利于提升工作面回采率,进一步提高矿井服务年限。在煤矿生产过程中,如何能最大限度地保护地面的基础设施、建(构)筑物和矿区生态环境,使其免受或减轻采动损害,自19世纪初以来,一直是世界各国研究的热点。为此,国内外学者做了大量的科研工作<sup>[11-13]</sup>,一直在不断探索采矿与环境相协调的煤炭开采技术和方法,并取得了大量的科研成果。但厚松散层下采煤地表沉陷特征及规律分析依然存在许多的问题<sup>[14-16]</sup>。基于上述研究背景,对云驾岭煤矿三采区12303工作面和12305工作面产生的地表沉陷机理进行分析和研究,为云驾岭煤矿或相似地质采矿条件的矿井防灾、减灾提供理论依据,促进煤炭工业安全、科学和可持续发展以及煤矿区的良性生态循环。

## 1 工程概况

冀中能源邯矿集团云驾岭煤矿位于武安市西北,井田走向长为6.0 km,倾斜斜宽为1.6 km,已批准可采范围达9.517 km<sup>2</sup>。厚松散层、大采高为云驾岭矿鲜明的地质条件,覆盖第四系松散层,第四系松散层厚度为90~150 m,平均层厚为120 m,开采2号煤层,煤层均厚4.2 m,倾角17°。建筑物下压煤问题突出,东马庄和西马庄位于三采区南部,且覆盖面积大。同时,12303工作面上方有矿区专用铁路线经过,存在一定量的铁路下压煤。在目前的开采深度若按计划留设保护煤柱,将直接影响矿井的正常生产。另外,从井下工作面支护和留巷方式看,云驾岭煤矿由于采高达到4.2 m,采煤工艺采用综合机械化一次采全高,开采强度大;同时由于松散层厚、采深大导致矿山压力较大,工作面巷道支护困难,煤炭开采采用无煤柱护巷、高水材料充填技术,巷内采用锚索、锚网联合支护方式。

为分析云驾岭三采区厚松散地质条件地表沉陷规律,共布置4条观测线。沿工作面走向方向布置观测线U和观测线Z;沿工作面倾向上山方向布置观测线E;沿工作面倾向下山方向布置观测线W。观测线U沿采区上方公路铺设57个测点,长度约1 400 m;观测线Z沿矿区专用铁路线铺设52个测点,长度约1 275 m;观测线E布置测点34个;观测线W布置观测点18个。由于观测线W和观测线E沿农田布置,观测点由于破坏严重而导致误差较大。地表移动观测线与井下工作面位置关系和回采时间上分析,观测线U监测工作面受其他工作面的采动影响。结合各种制约因素,本次以分析观测线Z的实测数据为主。观测站及采区内工作面空间相对分

布如图1所示。观测期为2014年5月7日至2016年4月6日,共实施水准测量11次,全面观测5次。

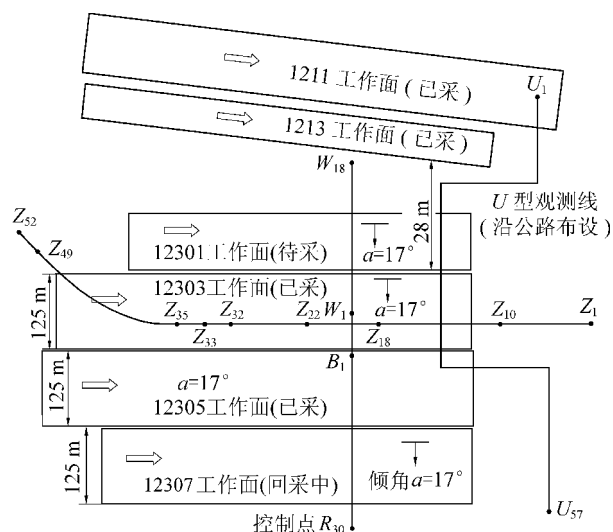


图1 观测线与各工作面相对位置

Fig.1 Observation line and relative position of mining face

## 2 地表终态移动变形特征及角量参数求取

### 2.1 实测地表终态移动变形特征

由于地质采矿条件的差异,如采高、采深、覆岩特性等,地表终态移动变形在井下采掘活动结束后仍持续很长时间,并不仅存在于地表沉陷监测到的移动变形数据<sup>[17]</sup>。大量实践数据证明<sup>[18-20]</sup>,通过最后一次沉陷监测所获取的移动变形量来确定的地表终态移动变形特征和角量参数来指导矿井留设保护煤柱和解放“三下”压煤仍然具有一定的指导意义。

本次地表终态移动变形分析的依据是2016年4月6日最后1次观测数据。云驾岭矿三采区各工作面之间在采煤过程中不留护巷煤柱而用其他方式维护巷道,因此在分析地表终态移动变形时把12303和12305工作面视为整体进行处理。12303工作面于2014年11月20日停采,依据2015年2月3日的观测数据(距工作面停采时间为76 d,12305工作面仅推进82 m),12303和12305工作面开采后走向观测线Z下沉、倾斜、曲率、水平移动和水平变形曲线如图2所示;各工作面开采后不同观测线地表移动变形的极值见表1。

由图2a可以看出,12303工作面开采后,下沉量为229 mm,当12305工作面回采后,下沉量达到了750 mm,增加228%;当12305工作面开采后,采空区面积增大,地下开采从极不充分开采过度到充分开采,采动程度由0.17变化至0.37,从而导致

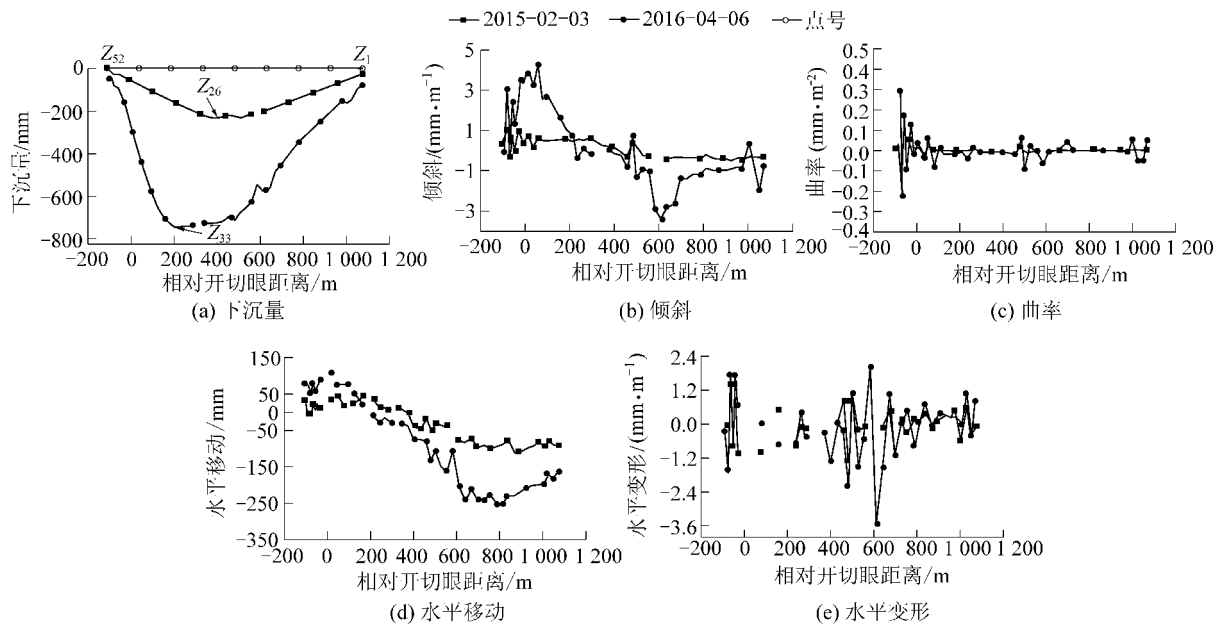


图2 各工作面开采后Z观测线下沉参数曲线

Fig.2 Subsidence parameters curves of Observation Line Z after working faces mining

了地表下沉量的增大。从图2b—图2e及表1可以看出,下沉量的显著增大导致地表的倾斜、曲率、水平移动和水平变形均不同程度的增加,观测线Z水平移动极值从101 mm增加至246 mm,增加144%。

表1 各工作面回采后地表移动变形极值

Table 1 Surface movement deformation extremun after mining face

工作 面	下沉量/ mm	倾斜/ (mm·m <sup>-1</sup> )		水平移动/ mm		水平变形/ (mm·m <sup>-1</sup> )	
		正值	负值	正值	负值	正值	负值
12303	229	0.70	-0.44	41	-101	0.87	-1.06
12305	750	3.79	-2.80	109	-246	1.72	-1.62

## 2.2 地表终态移动变形角量参数确定

通过监测关键点的移动变形量为基准,可以确定充分采动角、边界角和移动角。充分采动角以充分采动的范围来衡量,充分采动的范围可以通过移动盆地平底边缘在地表水平线上的投影点来确定。边界角以最外边界点(下沉量等于10 mm的点)为基准,移动角以地表变形对砖混结构长度小于20 m的建筑物有无危害为标准的,其临界变形值为水平变形3 mm/m、倾斜2 mm/m、曲率0.2 mm/m<sup>2</sup>。依据实测资料确定的各关键点及各角量参数:移动角 $\delta$ 为67°,左充分采动角 $\Psi_3$ 为70°,右充分采动角 $\Psi_4$ 为61°,边界角 $\delta_0$ 为57°,如图3所示。

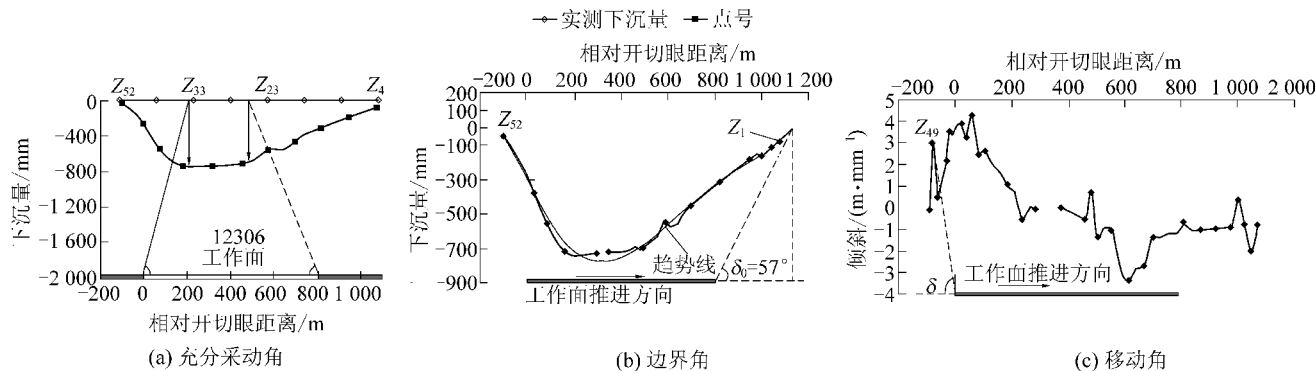


图3 角量参数的确定

Fig.3 Determination of angle parameters

由于观测线Z未布置在主断面,充分采动角通过实测数据近似求取。由图3a可以看出,12305工作面开采后,下沉盆地平底的左边界点为Z<sub>33</sub>号监测点,最大下沉量为750 mm,下沉盆地平底的右边界点为Z<sub>23</sub>号监测点,最大下沉量为712 mm,观测线相

应工作面平均采深按590 m来计算,最终确定的左充分采动角为70°,右充分采动角为61°。

对最后一次下沉监测数据做趋势分析如图3b所示。下沉量为10 mm的点位置有2个,分别为距离开切眼-47.5 m、距离终采线1 181.7 m(该点距终

采线的水平距离为 394.739 m)。据此,求得边界角  $\delta_0 = 57^\circ$ 。与一般地质采矿条件下相比,厚松散层下开采地表移动盆地展布范围更广,所求得的边界角也较小。如图 3c 所示,其中监测点  $Z_{49}$  的倾斜为 3.05 mm/m,可确定为地表的临界变形值,据此求得移动角  $\delta$  为  $67^\circ$ 。

### 3 地表动态沉陷特征

#### 3.1 地表下沉动态

选取 2014 年 6 月 10 日至 2016 年 4 月 5 日沿采煤工作面走向观测线 Z 的观测资料绘制地表下沉曲线如图 4 所示。

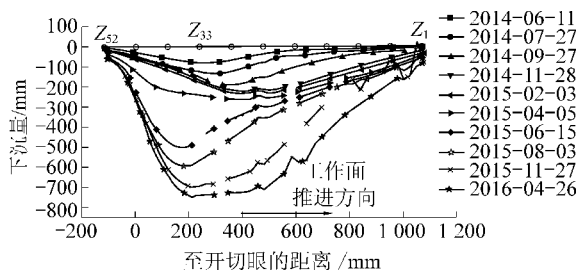


图 4 观测线 Z 动态下沉曲线

Fig.4 Dynamic subsidence curves of Observation Line Z

从实测数据的整体角度来看,沿工作面方向开采,随着距离的不断增大,采出空间的越来越大,造成上覆岩层垮落,基岩上部的松散土体发生弯曲下沉,工作面的不断推进,导致了地表沉降量的持续增加。

掌握最大下沉速度的变化规律和特征,可以确定采矿过程中最大的地表移动的发生时间,通过大量的监测数据进行回归分析,确定最大下沉速度经验公式。事实上,地表下沉速度与覆岩岩性,工作面推进度,工作面开采程度,开采高度,地表最大沉降等因素有关。云驾岭煤矿地表最大下沉速度  $V_{\max}$  可借鉴已有的经验公式<sup>[21]</sup>为

$$V_{\max} = qvmD_1 \cos \alpha / H_0 \quad (1)$$

式中: $q$  为下沉速度系数; $v$  为工作面推进速度, m/d; $m$  为采高, m; $D_1$  为工作面斜长, m; $\alpha$  为煤层倾角, ( $^\circ$ );  $H_0$  为平均开采深度, m。

根据 12303 工作面地质开采条件,  $v = 2.45$  m/d,  $m = 4.2$  m,  $D_1 = 105$  m,  $\alpha = 17^\circ$ , 平均采深  $H_0 = 570$  m,  $V_{\max} = 1.43$  mm/d。把前述各参数代入式(1)可得到下沉速度系数  $q = 0.8$ 。

云驾岭矿三采区各工作面之间在采煤过程中不留护巷煤柱而用其他方式维护巷道,因此在分析下沉系数时把 12303 和 12305 工作面视为整体进行处理。在非充分开采条件下通过非线性最小二乘拟合

法取得云驾岭三采区的地表下沉系数为 0.78<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 地表下沉速度及最大滞后

根据实测资料,绘制 12303 工作面 12305 工作面开采地表下沉速度曲线图,绘制工作面推进度与地表最大下沉点位置关系如图 5 和图 6 所示。

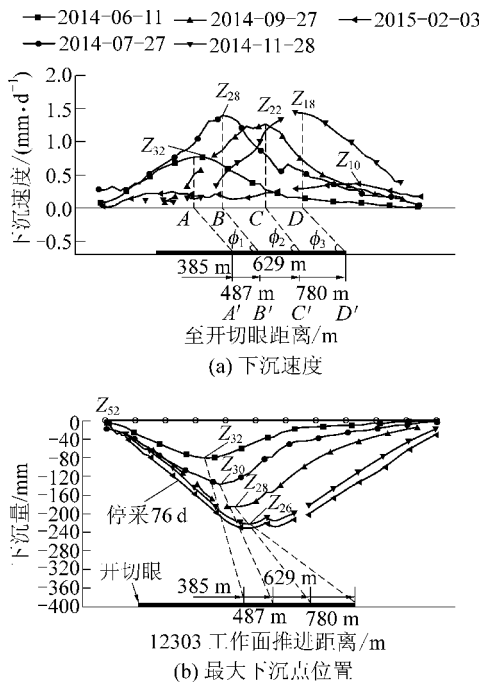


图 5 12303 工作面地表下沉速度及下沉点位置

Fig.5 Surface subsidence and subsidence speed position of No.12303 working face

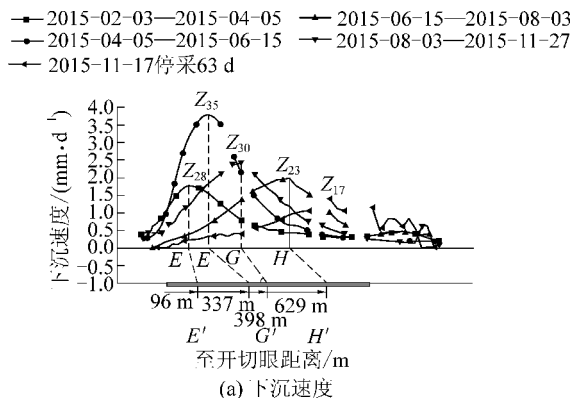


图 6 12305 工作面地表下沉速度及下沉点位置

Fig.6 Surface subsidence speed and subsidence position of No.12305 working face



从图5所知,当12303工作面推进至385 m时,地表最大下沉速度点为 $Z_{32}$ 号,下沉速度为0.77 mm/d。当工作面分别推进到487、629和780 m时,地表最大下沉速度显著增加,3个下沉速度极值分别为1.40、1.26、1.43 mm/d,其对应的最大下沉速度的点分别为 $Z_{28}$ 、 $Z_{22}$ 和 $Z_{18}$ 。最大下沉速度滞后距分别为142、127和168 m,平均滞后距为146 m,最大下沉速度角分别为 $76^\circ$ 、 $77^\circ$ 和 $74^\circ$ ,平均滞后角为 $76^\circ$ 。工作面停采76 d后地表下沉速度较慢,最大下沉速度点为 $Z_{10}$ ,下沉速度极值降至0.37 mm/d。

从图6所知,当12305工作面推进到96 m时,地表最大下沉速度点为 $Z_{28}$ ,下沉速度为0.77 mm/d。当工作面推进337 m时,最大下沉速度达到3.8 mm/d,相应的监测点为 $Z_{35}$ ,最大下沉速度滞后距为177 m,最大下沉速度滞后角为 $74^\circ$ 。当工作面分别推进到398和629 m时,下沉速度极值点分别为 $Z_{30}$ 和 $Z_{23}$ ,下沉速度分别为2.39和1.94 mm/d,最大下沉速度滞后距分别为106 m和147 m,最大下沉速度滞后角分别为 $80^\circ$ 和 $76^\circ$ 。综合所述,12305工作面开采地表最大下沉速度平均滞后距为143 m,最大下沉速度平均滞后角为 $77^\circ$ 。与开采12303工作面相比,最大下沉速度平均滞后距降低3 m,最大下沉速度滞后角略有增加,造成上述的结果主要是由于12305工作面的开采属于二次采动,上覆岩层经历了初次采动的变形影响,发生垮落、断裂和弯曲,重复采动后相当于上覆岩层岩性“变软”了。

地表下沉速度滞后角 $\Phi$ 是指回采工作面与地表下沉速度之间的连线,以及采空区一侧煤层的夹角,其计算公式为

$$\Phi = \arctan(L/H_0) \quad (2)$$

式中: $L$ 为滞后距,m; $H_0$ 为平均开采深度,m。

### 3.3 地表移动延续时间分析

地表移动延续时间是最大下沉点随时间的变化至稳定的时间。在“三下”开采规定中,明确规定地表移动期结束的标志是:最大下沉点连续6个月下沉不超过30 mm,并以下沉速度1.67 mm/d为分界点(煤层倾角小于 $45^\circ$ ),把最大下沉点的持续周期划分为3个阶段,即初始阶段、活跃阶段和衰退阶段。根据12303和12305工作面地表沉陷监测数据,选取走向观测线 $Z$ 上的最大下沉点 $Z_{33}$ 号监测点作为研究对象来分析地表移动的延续时间。该点下沉量、下沉速度随时间的变化关系如图7所示。

12303工作面开采后,以下沉速度1.67 mm/d为分界点,可以看出最大下沉点 $Z_{33}$ 的初始阶段时长为44 d,活跃阶段为15 d,仅占整个地表移动时间的

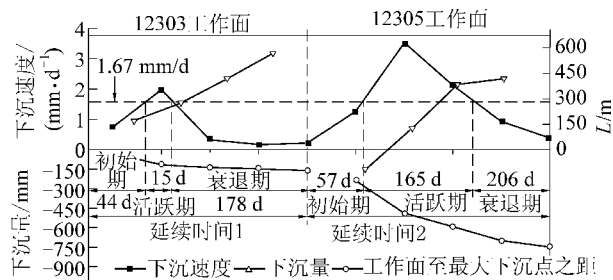


图7 地表移动延续时间的确定

Fig.7 Determination of surface movement duration

6%,衰退阶段时长178 d,占整个地表移动时间的75%。随着12305工作面的开采,监测点下沉量和下沉速度明显增加,初始阶段时长57 d,活跃阶段时长165 d,占整个地表移动时间的39%,衰退阶段时长206 d(截至最后一次观测)。

厚松散层下开采引起的地表沉陷明显不同于一般地质结构,厚松散层下开采初始阶段时间短,地表移动很快进入到了活跃阶段,且下沉速度大,下沉量大,地表移动剧烈,整个地表移动周期长等规律。在下沉的初始阶段,由于松散层的厚度大,其结构强度较小,在初采后移动变形现象明显,当松散层上部存在隔水层且渗透系数小,导致其孔隙水消散缓慢,从而增加了衰退阶段的时长。

依据“三下”采矿规定,在没有具体数据时,地表移动延续时间 $T$ 为

$$T = 2.5H_0 \quad (3)$$

当12303工作面平均采深 $H_0$ 为570 m,即12303工作面的地表移动周期 $T=1\,425$  d。

美国西弗吉尼亚大学教授SYD S Peng<sup>[21]</sup>通过研究认为,地表移动延续时间与开采深度、工作面前进速度和边界角关系密切,可用式(4)表示为

$$T = \frac{H_0(\cot \Psi + \cot \delta_0)}{v} \quad (4)$$

式中: $\Psi$ 为充分采动角; $\delta_0$ 为边界角; $v$ 为工作面推进速度,m/d。

根据前述计算结果,走向充分采动角按 $70^\circ$ 进行计算,走向边界角等于 $57^\circ$ ,12303工作面推进速度为2.45 m/d。即12303工作面的地表移动周期为236 d。显然式(3)和式(4)计算结果差异巨大,哪个公式计算结果与实际相符,需要后续实测数据的检验。但12303工作面实测数据表明,地表移动延续时间与式(4)计算结果相符,虽然其未达到充分采动,但从侧面也能反映出,仅考虑单一影响因子来计算地表移动的延续时间有待于进一步改进,至少在云驾岭煤矿厚松散层下开采预测地表移动周期并不适用。

## 4 结 论

1) 基于云驾岭矿 12303 和 12305 工作面开采 Z 线下沉、倾斜、曲率、水平移动和水平变形终态沉陷特征,确定了地表终态移动变形角量参数:充分采动角为走向左  $70^\circ$ 、走向右  $61^\circ$ ,走向边界角  $57^\circ$ ,走向移动角为  $67^\circ$ 。边界角明显大于一般规律角量,直接导致了地表沉陷呈现范围广的特征。

2) 求取了最大下沉速度滞后距、最大下沉速度滞后角、超前影响距和超前影响角。12303 工作面开采时地表最大下沉速度平均滞后距为 146 m,最大下沉速度平均滞后角为  $76^\circ$ ;12305 工作面开采时地表最大下沉速度平均滞后距为 143 m,最大下沉速度平均滞后角为  $77^\circ$ ;12303 工作面开采超前影响角为  $56^\circ$ ,平均超前影响距为 388 m,以此为基础确定了地表最大下沉速度的经验公式。

3) 12303 工作面开采后,地表最大下沉点延续时间初始期约为 44 d,衰退期约为 178 d,活跃期较短约为 15 d,累计 237 d;12305 工作面开采后,地表下沉延续时间初始期为 57 d,活跃期约为 165 d,衰退期为 206 d,累计 428 d。地表移动延续时间应综合考虑开采深度、工作面推进速度和边界角的影响,仅考虑单一影响因子来计算地表移动的延续时间有待于进一步改进。

## 参考文献 (References):

- [1] 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 surface dynamic movement and deformation under thick loose layer mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2056-2062.
- [2] LOUPASAKIS C, ANGELITSA V, ROZOS D. *et al.* Mining geo-hazards—land subsidence caused by the dewatering of opencast coal mines : a case study of Amyntaio Coal Mine, Florina, Greece [J]. Natural Hazards, 2014, 70(1): 675-691.
- [3] 肖 武,陈佳乐,胡振琪,等.高潜水位采煤沉陷地构建平原水库可行性分析与实践[J].煤炭科学技术,2017,45(7):184-189.  
XIAOWu, CHEN Jiale, HU Zhenqi, *et al.* Feasibility analysis and practice of constructing plain reservoirs in high underground water mining subsidence area [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(7): 184-189.
- [4] 贾新果.采煤沉陷区地表残余沉陷时间函数模型研究[J].煤炭科学技术,2018,46(11):157-162.  
JIA Xinguo. Study on time function model of residual subsidence at surface coal mining subsidence area [J]. Coal Science and Technol-

- ogy, 2018, 46(11): 157-162.
- [5] CUI, Ximin LI, Chunyi , HU Qingfeng *et al.* Prediction of surface subsidence due to underground mining based on the zenith angle [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 60(6): 246-252.
- [6] 谢生荣,张广超,何尚森,等.深部大采高充填开采沿空留巷围岩控制机理及应用[J].煤炭学报,2014,39(12):2362-2368.  
XIE Shengrong, ZHANG Guangchao, HE Shangsen. Control mechanism and application of surrounding rock for gob side entry retaining in deep mining with large mining height and filling mining [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2362-2368.
- [7] 刘义新.厚松散层下深部开采覆岩破坏及地表移动规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2010.
- [8] 李江华,许延春,姜 鹏,等.巨厚松散层薄基岩工作面覆岩载荷传递特征研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):95-100.  
LI Jianghua, XU Yanchun, JIANG Peng, *et al.* Study on load transmission characteristics of overburden rock above coal mining face in thin bedrock of super thick unconsolidated stratum [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 95-100
- [9] 王军保,刘新荣,刘小军.开采沉陷动态预测模型[J].煤炭学报,2015,40(3):516-521.  
WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Xiaojun. Dynamic prediction model of mining subsidence [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 516-521.
- [10] 李德海,陈祥恩,李东升.厚松散层下开采地表移动预计及岩移参数分析[J].矿山压力与顶板管理,2002,19(1):90-92,109.  
LI Dehai, CHEN Xiangen, LI Dongsheng. Prediction of surface movement and analysis of rock movement parameters under thick loose layer mining [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(1): 90-92, 109.
- [11] TUGRULUnlu, HAKANAkcin, OZGURYilmaz. An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins [J]. Engineering Geology, 2013, 166(8): 186-203.
- [12] 王启春,李 建,郭广礼.重庆市矿区开采沉陷预计参数类比分析研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):196-202.  
WANG Qichun, LI Jian, GUO Guangli. Study on analogy analysis on prediction of surface subsidence parameters in mining area of Chongqing City [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 196-202.
- [13] 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.* Influence of mining height under thick loose layer on dynamic subsidence characteristics of land surface [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 191-196.
- [14] 陈俊杰,陈 勇,郭文兵,等.厚松散层开采条件下地表移动规律研究[J].煤炭科学技术,2013,41(11):95-97,102.  
CHEN Junjie, CHEN Yong, GUO Wenbing, *et al.* Study on surface movement rule under thick loose layer mining condition [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 95-97, 102.
- [15] REN G, LI J, BUCKERIDGE J. Calculation of mining subsidence

- and ground principal strains using a generalized influence function [J]. *Mining Technology*, 2010, 119(1): 34-41.
- [16] 柴华彬, 邹友峰, 梁和平, 等. 开采沉陷岩移参数研究现状分析 [J]. 河南理工大学学报, 2013, 32(5): 567-570.  
CHAI Huabin, ZOU Youfeng, LIANG Heping. Analysis of rock shift parameters in mining subsidence analysis [J]. *Journal of Henan Polytechnic University*, 2013, 32(5): 567-570.
- [17] 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. Prediction of surface subsidence based on normal distribution time function [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S1): 108-116.
- [18] 赵忠义, 陈昕昕, 梁华杰. 不同松散层厚度对地表沉降特征的影响研究 [J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 26-28.  
ZHAO Zhongyi, CHEN Xinxin, LIANG Huajie. Influence of different loose layer thickness on ground settlement characteristics [J]. *Coal Technology*, 2017, 36(8): 26-28.
- [19] 许延春, 刘世奇, 高玉兵, 等. 厚松散层内部微变形规律研究 [J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 10-13, 23.  
XU Yanchun, LIU Shiqi, GAO Yubing, *et al.* Study on the internal micro deformation law of thick loose layer [J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(10): 10-13, 23.
- [20] 徐乃忠, 高超, 吴太平. 浅埋深高强度综采地表沉陷规律实测研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 150-154, 202.  
XU Naizhong, GAO Chao, WU Taiping. Study on actual measurement of surface subsidence law occurred by shallow mining depth and high intensity fully mechanized coal mining [J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(10): 150-154, 202.
- [21] REN G, LI G, KULESSA M. Application of a generally influence function method for subsidence prediction in multi-seam longwall extraction [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(4): 1123-1131.
- [22] SYD S Peng. Surface subsidence engineering [M]. New York: The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc 1992.