



移动扫码阅读

石国牟, 张丽佳, 胡振琪, 等. 陕北黄土沟壑地貌地表移动变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(4): 157-165.  
SHI Guomou, ZHANG Lijia, HU Zhenqi, *et al.* Research on surface movement and deformation characteristics of loess gully landform in Northern Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(4): 157-165.

## 陕北黄土沟壑地貌地表移动变形特征研究

石国牟<sup>1</sup>, 张丽佳<sup>2</sup>, 胡振琪<sup>1,3</sup>, 浮耀坤<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035;  
3. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**为研究黄河流域中游陕北矿区湿陷型黄土沟壑地貌高强度开采地表移动变形特征, 对柠条塔矿黄土沟壑区 N1212 工作面开展系统的地表沉陷监测, 分析黄土沟壑地貌高强度开采条件下地表沉陷变形特征, 确定地表最大下沉速度及最大下沉速度滞后角, 地表移动时间和动态地表移动参数。研究表明: 陕北湿陷型黄土层高强度煤炭开采地表非连续变形破坏严重, 黄土地表易受移动变形与地形条件复合影响, 出现不均匀沉降, 高强度开采条件下, 地表移动变形发育剧烈, 地表最大下沉量 5 255 mm, 最大水平移动值 2 680 mm, 最大下沉速度为 187.4 mm/d, 单一煤层开采最大下沉系数为 0.63, 斜交重复采动最大下沉系数为 0.84, 活跃期约 55 d, 期间下沉量占总下沉量 97%, 最大下沉速度滞后距为 74 m, 最大下沉速度滞后角 67°。上述结果验证了浅埋煤层高强度开采时, 地表下沉剧烈、活动周期短、重复采动时, 地表下沉量与地质采矿因素成正比, 沟谷地形高强度开采地表变形具有速度快、塌陷大、损害重的特征。

**关键词:**黄土沟壑区; 地表沉陷; 下沉速度; 移动变形规律; 动态变化

中图分类号: TD173

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)04-0157-09

### Research on surface movement and deformation characteristics of loess gully landform in Northern Shaanxi

SHI Guomou<sup>1</sup>, ZHANG Lijia<sup>2</sup>, HU Zhenqi<sup>1,3</sup>, FU Yaokun<sup>1</sup>

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 3. School of Environment Science and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the surface movement and deformation characteristics of the collapsible loess gully landform in the northern Shaanxi mining area in the middle reaches of the Yellow River Basin, the N1212 working face in the loess gully area of the Ningtiaota Mine has been systematically monitored for surface subsidence to analyze the high-intensity mining conditions Deformation characteristics of the ground surface subsidence, determine the maximum surface subsidence speed and the maximum subsidence speed lag angle, surface movement time and dynamic surface movement parameters. The results of the study show that the discontinuous deformation and destruction of the surface in high-strength coal mining in the collapsible loess layer in northern Shaanxi are severe, and the loess surface is easily affected by the combined effects of movement and deformation and topographic conditions, resulting in uneven settlement. Under high-strength mining conditions, the surface movement and deformation are severely developed, The maximum surface subsidence value is 5 255 mm, the maximum horizontal movement value is 2 680 mm, the maximum subsidence speed is 187.4 mm/d, the maximum subsidence coefficient of single coal seam mining is 0.63, the maximum subsidence coefficient of oblique repeated mining is 0.84, the active period is about 55 d, and the period of subsidence is about 55 d. The amount accounts for 97% of the total subsidence, the maximum lagging distance of the down-town velocity is 74 m, and the maximum lagging angle of the sinking velocity is 67°. The above results verify

收稿日期: 2022-06-15 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0626

基金项目: 陕西煤业化工集团有限责任公司重大项目(2018SMHKJ-A-J-03); 国家自然科学基金资助项目(41771542)

作者简介: 石国牟(1995—), 男, 安徽芜湖人, 硕士研究生。E-mail: SHIGM1@163.com

通讯作者: 张丽佳(1987—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 工程师。E-mail: 253393908@qq.com

that in the high-intensity mining of shallow coal seams, the surface subsidence is proportional to the geological mining factors when the ground subsidence is severe, the activity period is short, and the mining is repeated. The surface deformation of high-intensity mining in the valley terrain has the characteristics of fast speed, large collapse and heavy damage.

**Key words:** loess gully area; surface subsidence; subsidence velocity; movement and deformation law; dynamic change

## 0 引言

2020年全国煤炭产量达38亿t,煤炭持续在我国能源结构中占主导作用。近几年西部已成为国家煤炭主产区,黄河流域中上游涵盖7个国家级大型煤炭基地<sup>[1]</sup>。西部生态环境脆弱,黄河流域生态环境保护与高质量发展又上升至国家重大战略。陕北煤炭基地位于黄河流域中游处,大范围分布黄土沟壑地貌,地表黄土具湿陷型,其力学性质较弱、结构疏松、多空隙,极易受采动影响,沟壑坡体产生不连续变形和突变失稳的地表破坏特征。加上受雨水冲刷,使得地表破碎,加重水土流失,从而影响到黄河流域的水沙关系。因此,在该区域进行高强度煤炭开采时,地表移动变形具有明显的特殊性和复杂性,极易对矿区生产活动和黄河流域生态环境构成威胁。

西部生态脆弱区高强度开采地表移动变形规律持续受到众多学者的关注。余学义等<sup>[2]</sup>针对神东矿区工程地质条件,研究了厚松散层大采高开采地表移动变形规律;于洋等<sup>[3]</sup>基于两淮矿区实测数据,详细分析了地质采矿条件对边界角、移动角的影响,得出综合移动角、综合边界角与第三、四系松散层厚度之间存在着对数关系;汤伏全等<sup>[4]</sup>研究了开采沉陷前后地形的坡向、变异系数、坡度等因子变化特征,并表明各地形因子均受开采沉陷影响而发生改变;原涛<sup>[5]</sup>对渭北黄土覆盖矿区地表沉陷研究表明了黄土沟壑区采煤沉陷引起的山坡侧向滑移变形是渭北矿区地表移动变形的重要特征,在薄基岩厚黄土层开采条件下,黄土层的沉陷变形与基岩沉陷保持同步移动;刘义新等<sup>[6]</sup>通过建立巨厚松散层下深部宽条带开采数值模型,研究巨厚松散层下深部宽条带开采时松散层厚度变化与地表移动规律及下沉系数的关系;赵兵朝等<sup>[7]</sup>研究了柠条塔煤矿在黄土沟壑地形条件下的地表岩移参数求取问题,利用坡体稳定性分析及计算机反演模拟的方法,对概率积分参数进行了修正。目前多数研究在分析区域性的采动影响、地上地下采动关系方面具有一定的局限性。

针对陕北湿陷型黄土沟壑区高强度开采的地表移动规律需要进一步研究,尤其是受影响的地表环境损伤特征与采矿过程、采矿条件的耦合关系的研究尚且不足。以柠条塔煤矿井北一盘区为研究对象,

考虑黄土沟壑区特殊地形条件,基于地表移动观测资料,分析湿陷型黄土层下采动的地表移动变形规律。

## 1 地质采矿条件

柠条塔煤矿位于陕北黄土高原北部,区内沟谷纵横。观测区为柠条塔煤矿北一盘区N1212工作面上方,地表广泛覆盖湿陷型黄土,N1212工作面 $2^{-2}$ 煤层厚度为4.05~5.90 m,平均4.8 m,该工作面长度294.4 m,走向长度1 965 m,煤层埋藏深度在140~220 m,平均采深190 m,基岩厚度平均105 m,主要由粉砂岩和中粒砂岩组成,上覆黄土层平均厚度95 m。回采时间2018年10月至2019年11月结束,采用走向长壁采煤法,一次采全高,全部垮落法管理顶板,工作面推进与回采速度2.4~27.2 m/d,开采强度高。本区顶板上有 $1^{-2}$ 煤N1118工作面老采空区,该工作面于2018年2月停采,与 $2^{-2}$ 煤层间隔约40 m,距N1212工作面开切眼约540 m处停采,平均煤厚1.85 m,基岩厚度65 m。两工作面平均倾角小于 $2^{\circ}$ ,均为近水平煤层。

## 2 观测站布置与观测

为进一步分析地表岩移参数特征,结合该矿地形地貌特征,采用剖面法在N1212工作面上方布设地表移动观测站。设计走向观测线(A线)一条,长1 200 m,倾向观测线(B线)一条,长600 m,位于距离开切眼800 m的采空区上方,走向观测线与倾向观测线互相垂直,分别布置在地表移动盆地走向、倾斜主断面上,如图1所示。

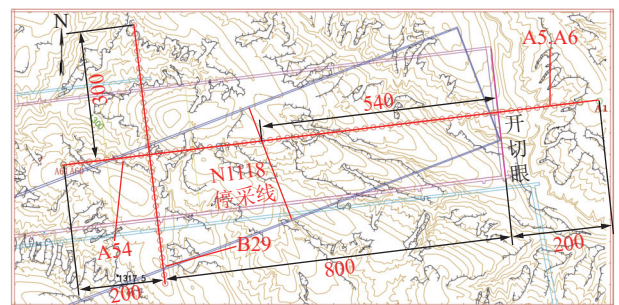


图1 A、B观测线断面图

Fig.1 Sectional view of observation line A and B

观测线点间距均为20 m,开切眼外观测线长度均200 m,布设92个地表移动观测站,2条观测线交汇

于 A46(B17)点。

在 2019 年 1 月 10 日完成了首次全面观测, 2019-01-19—2020-03-20 共对走向观测线地表沉降进行了 38 次观测, 对倾向观测线地表沉降进行了 25 次观测。

### 3 湿陷型黄土沟壑区开采地表移动特征分析

黄土区 N1212 工作面开采过程中会受到重复采动和沟壑地形的影响, 工作面推进方向经历重复采动—单煤层开采过程, 形成重复采动区以及单一煤层开采影响区, 布设的倾向观测线位于重采影响区之外。由于测线受地形因素影响, 走向观测线部分数据缺失, 个别参数的推导仅对倾向线进行分析研究, 以倾向数据为依据, 走向数据为辅, 得出结论。

#### 3.1 地表下沉特征分析

1) 下沉曲线。随着工作面不断地推进, 根据观测数据, 各观测线点位移动已基本稳定, 如图 2 所示。

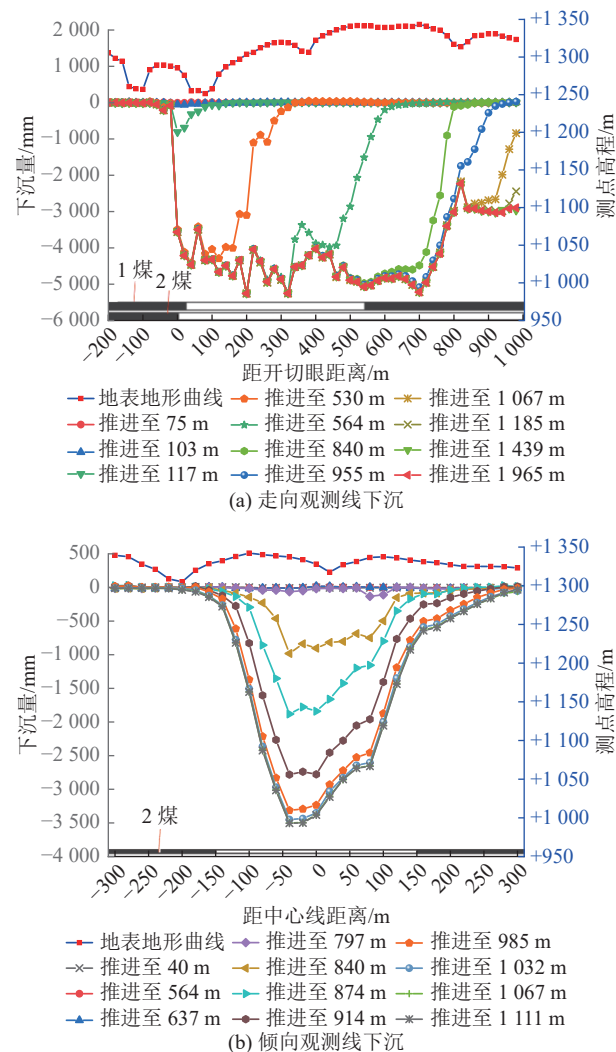


图 2 地表下沉曲线

Fig.2 Surface subsidence curve

走向方向上, 部分阶段受到 N1118 工作面重复采动的影响, 根据第 2 次观测数据, 井下推进至 75 m, 地表出现大于 10 mm 下沉量, 综合现场地表沉陷情况、工作面推进速度和推进时间进行计算, 启动距在 45~60 m, 1/4~1/3 倍平均采深。由 2019 年 1 月 28 日第 3 次观测(推进至 103 m)和 1 月 30 日第 4 次观测(推进至 117 m)的下沉曲线可知(图 2a), 地表最大下沉量从 -61 mm 迅速增加至 -811 mm, 此时盆地形态初现, 工作面上覆关键层断裂, 此时开切眼一侧下沉盆地边缘曲线形态极为陡峭, 而工作面煤柱侧盆地边缘曲线稍缓。随着工作面推进下沉量迅速增加, 地面最大下沉量为 5 255 mm, 位于 A21 号点附近, 距开切眼 200 m 左右。

倾向方向上, 当工作面接近倾向线下方时地表受到扰动, 在推进距开切眼 797 m 及 840 m 进行了两次观测, 观测间隔为一周左右, 而地表下沉量发生较大变化, 由 101 mm 迅速增加至 1 881 mm, 随着工作面继续推进, 下沉量持续增加, 地表最大下沉量达到 3 513 mm, 并且达到充分采动, 如图 2b 所示。

2) 水平移动曲线。通过各个时期观测数据获得走向和倾向上水平移动曲线, 并分析地表水平移动变化情况, 如图 3 所示。

走向方向上水平移动较为特殊且复杂, 工作面上方有部分  $1^{-2}$  煤采空区, 工作面推进 0.6 倍采深时, 水平移动值开始迅速增加, 开切眼附近至 0.47 倍采深处, 地表点朝着远离开切眼方向移动; 随着工作面不断向坡体推进, 各地表点向着采空区并向开切眼方向移动, 由于黄土沟壑地形, 部分水平移动有所增大或减小, 尤其地表冲沟处的水平移动更为异常; 当工作面推进至 N1118 工作面终采线之后, 由于上方留存煤柱支撑作用, 水平移动值逐渐增加, 随后地表点向着新形成采空区移动, 并远离开切眼, 表现为逐渐增大的正水平移动值; 距终采线 100 m 左右, 由于 2 个不同采空区共同作用, 沟壑受采影响出现坡体裂缝坍塌, 裂缝导致的塌陷坑受力不再连续, 地表水平移动值变化不大, 如图 3a 所示; 距开切眼 1 000 m 之后有大量冲沟发育, 此时工作面顺坡推进, 地表点整体向远离开切眼方向移动且形变大, 水平移动最大值为 2 680 mm。

倾向 B 线上, 水平移动曲线较为对称, 上山方向与下山方向地表水平移动都指向工作面中心。距中心线 -300~0 m, 边界点至曲线拐点间的水平移动值先渐增至最大, 后逐渐减少至 0; 在距中心线 0~300 m, 地表水平移动在另一拐点处再次达到最大, 随后减

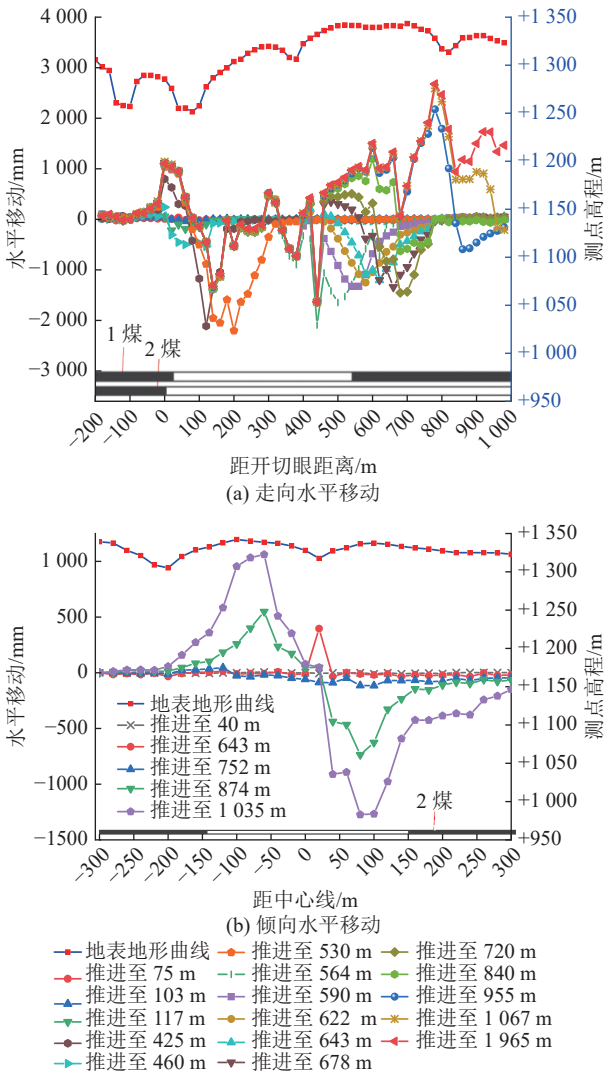


图3 地表水平移动曲线

Fig.3 Curve of horizontal movement of ground surface

小至边界处为0,水平移动最大值为1273mm。由于N1212工作面倾向方向上不受重复采动影响且地势较为平坦,从曲线分布上看水平移动曲线分布形态与平坦地貌水平移动的一般规律接近,如图3b所示。

走向和倾向地表移动整体上符合一般的沉陷规律,变形程度有所差异。走向方向上地形更加复杂,陡坡、沟谷分布且高差大,下沉曲线不对称,开切眼侧较为陡峭,说明在该地质条件下进行重复开采,沉陷盆地能够快速形成。走向和倾向上个别地方移动变形发生突变,变形值有突然增大或减小现象,变形曲线表现为不规则跳跃,且与地表地形相对应,在冲沟及坡体处极易发生这种突变<sup>[8]</sup>。地表垂直裂隙发育,进而引起的崩塌滑移,以及受采破碎的黄土地表遇水湿陷是造成局部发生突变的主要原因<sup>[9]</sup>。

### 3.2 地表移动预计参数

根据观测结果,分别计算统计走向和倾向的下

沉系数与各概率积分法参数。

1)下沉系数。在走向上,出现2个下沉盆地,分析认为,距N1212开切眼约540m处为N1118终采线,N1212工作面此阶段开采受到重复采动影响,随着N1212工作面的不断推进,下沉开始明显,逐渐形成下沉盆地,并到达充分采动,斜交叠置区开采最大下沉量5255mm;当工作面推进进度超过N1118工作面终采线,下沉量有所减小,距开切眼820m左右下降至最小,之后下沉量随着工作面推进有所增加,并形成新的下沉盆地,通过分析重复采动区影响范围,后续开采基本不受N1118工作面的影响,根据N1118下沉边界以及N1212工作面(1.2~1.4倍)采深,N1212工作面后续开采可以达到充分采动<sup>[10]</sup>,此时为N1212工作面单一煤层开采,最大下沉量3030mm,如图4所示。

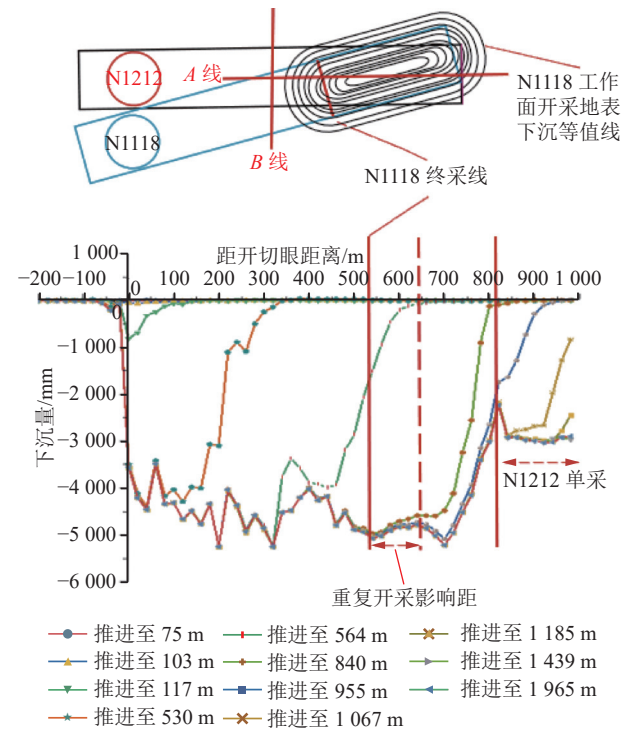


图4 N1118、N1212重复采动及单一煤层开采其下沉量、下沉系数分析

Fig.4 Analysis of subsidence value and subsidence coefficient of N1118 and N1212 repeated mining and single seam mining

N1212工作面平均采高 $h_{(N1212)}$ 为4.8m,近水平煤层,故N1212工作面单一开采时的下沉系数为

$$\eta_{N1212} = 3030/4800 = 0.63 \quad (1)$$

N1118工作面与N1212工作面位于同一区域,地质条件相同,均为近水平煤层,两工作面间隔较小,基岩性质和厚度相近,且为同一松散层,故以N1212工作面及临近工作面<sup>[11]</sup>单采下沉系数作为重复采动

区先采工作面 N1118 的下沉系数, 即  $\eta_{N1118}=0.63$ 。

选取叠置区 A21 号测点进行计算, A21 号测点出现叠置区最大下沉量  $W_{\max,s}$ ,  $W_{\max,s} = 5255$  mm, 叠置区下沉量同时受到 N1118 和 N1212 工作面重复采动的影响, 重复采动系数为  $K$ , N1118 下沉系数取 0.63, N1118 工作面平均采高  $h_{(N1118)}$  为 1.9 m, 其仅受 N1118 工作面采动影响下的最大下沉量  $W_{\max(N1118)}$  为:

$$W_{\max(N1118)} = \eta_{N1118} \times 1900 = 1197 \text{ mm} \quad (2)$$

故 N1212 工作面开采后下沉系数  $\eta_c$  为

$$\eta_c = (W_{\max,s} - W_{\max(N1118)}) / h_{(N1212)} = 0.84 \quad (3)$$

因此, 重复采动系数为  $K=\eta_c/\eta_{N1118}=1.33$ 。

2) 地表移动预计参数分析。根据图 2b 倾向线的下沉数据计算 B 线下沉系数; 结合 A、B 线水平移动值求取水平移动系数  $b$ , 即地表最大水平移动与最大下沉之比; 通过  $\tan \beta = H_0/r$  计算主要影响角正切,  $H_0$  为开采深度,  $r$  为主要影响半径; 综合分析 0.5 倍的地表最大下沉量以及最大水平移动值的位置, 求取拐点偏移距  $d$ 。并计算各综合值, 详见表 1。下沉系数达到 0.78, 水平移动系数为 0.44, 主要影响角正切值 2.38, 拐点偏移距为 45 m。

表 1 地表移动变形参数

Table 1 Surface movement and deformation parameters

位置	下沉系数 $\eta$	水平移动系数 $b$	主要影响角正切值 $\tan \beta$	拐点偏移距 $d/m$
A线	0.84	0.51	—	—
B线	0.73	0.36	2.38	45
综合值	0.78	0.44	2.38	45

表 2 地表移动角对比

Table 2 Comparison of surface movement angle values

工作面	基岩/m	松散层, 厚度/m	采厚/m	采深/m	深厚比	移动角/(°)			边界角/(°)			
						走向	下山	上山	走向	下山	上山	
N1212	95	黄土, 95	4.8	190	39.6	70.3	57.6	62.3	65.9	55.6	51.7	
柠条塔	N1114	62	黄土, 61	1.8	123	68.3	68.7	—	—	59.7	—	—
	N1206	104	黄土, 58	5.9	162	27.4	72.2	—	—	62.6	—	—
黄陵一矿	303/304	150	黄土, 105	3.0	255	85.0	70.0	70.0	67.5	56.0	53.5	53.5
张家峁	15201	58	黄土, 70	6.3	128	20.3	71.2	71.6	72.8	63.0	53.7	53.7
大柳塔	52304	185	黄土, 50	6.9	235	34.0	63.7	68.0	62.8	53.7	—	—
	1203	31	沙土, 30	6.5	61	9.4	67.3	71.0	70.0	63.7	63.0	61.0
韩家湾	2304	70	沙土, 65	4.1	135	32.9	62.5	62.0	63.0	58.7	57.2	58.5
哈拉沟	22407	116	沙土, 16	5.4	132	24.4	65.3	60.0	65.5	47.3	43.9	50.6

N1212 工作面松散层湿陷型黄土厚度 80 ~ 130 m, N1114、N1206、张家峁 15201、大柳塔 52304 工

分析认为, 工作面上方湿陷黄土厚度 60 ~ 130 m, 地表沟壑纵横, 极易受沉陷影响而发生滑坡、崩塌, 黄土自重产生压缩变形以及湿陷下沉<sup>[12]</sup>, 地表移动受到开采沉陷、滑移、湿陷共同的作用, 下沉系数较大。水平移动也受到沟壑地形的影响, 方向发生局部变化, 偏向坡沟方向, 水平移动系数相对较大。在该湿陷型黄土沟壑层下开采, 若不考虑地形高差, 地表下沉盆地极为陡峭, 主要影响半径相对变小, 主要影响角正切值较大。拐点偏移距 45 m, 为 0.24  $H_0$ , 在 0.08  $H_0$  ~ 0.30  $H_0$ , 上覆岩层属于中硬覆岩层<sup>[13]</sup>。

### 3.3 地表移动角值特征

边界角是描述地表移动盆地边界的重要参数, 影响其大小主要有采深、松散层厚度、采厚等因素; 移动角是描述地表移动盆地危险移动边界的参数, 影响其大小主要有上覆岩层性质、采深、采厚等因素<sup>[14]</sup>。

根据实测数据计算, N1212 工作面走向边界角 65.9°, 下山方向边界角 55.6°, 上山方向边界角 51.7°。工作面从开切眼始逐步推进过程中, 随着直接顶和基本顶的相继垮落, 基岩上部的松散层土体产生弯曲下沉, 随着工作面的继续推进, 造成地表下沉量的逐渐增大。在该地质条件下, 基岩与黄土力学性质差异较大, 松散层承载能力弱, 在高强度开采下使得移动变形传递到黄土层时间短、程度大, 采空区范围缩小, 移动角、边界角较大。为进一步分析黄土沟壑区高强度开采条件下的角量参数, 将不同地质采矿条件下部分矿区典型工作面的角量参数列出, 进行对比分析<sup>[15-19]</sup>, 详见表 2。

作面松散层黄土厚度均大于 50 m, 地表均为沟壑地貌; 黄陵一矿 302、303 工作面地表为特厚松散层, 黄

土厚度大于 100 m, 与大柳塔 52304 工作面的采深相近且采深较大; 大柳塔矿 1203、韩家湾 2304、哈拉沟 22407 工作面为风积沙所覆盖。以上工作面均采用综合机械化长壁采煤法, 全部垮落管理顶板, 一次采全高, 各煤层倾角较小。

经过对比分析可知, 与大柳塔、韩家湾、哈拉沟松散层为风积沙层条件下开采相比, 推进方向上边界角、移动角偏大。分析认为, 当松散层为风积沙时, 松散层具有明显的非塑性, 并且有较强的流动性, 在受采时, 工作面前方风沙地表形成下沉为 10 mm 的开采影响边界较远, 故边界角较小; 而根据 3 个临界变形条件 (倾斜变形  $\tau=3.0$  mm/m; 水平变形  $\varepsilon=2.0$  mm/m; 曲率  $\kappa=0.2\times 10^{-3}$  mm/m) 求取的移动角也偏小<sup>[13]</sup>。当松散层为湿陷型黄土时, 本身工作面采深小, 基岩厚度不大, 开采致使基岩全部破断, 上覆岩层属于中硬岩层, 而黄土相较于沙土流动性弱, 采动覆岩移动形变到达基岩与松散层接触面后, 力呈现非均匀形式传递, 黄土发生较大的塑性变形, 土体随着工作面推进快速破裂坍塌, 形成的下沉盆地边缘较风沙区陡峭, 下沉为 10 mm 位置处的开采影响边界较近, 因此边界角较大; 垂直裂隙大量发育, 使得应力得到一定释放, 地表变形不连续, 力学传递失去部分延伸性, 致使地表移动范围缩小, 从而移动角相对偏大。

N1212 工作面倾向方向上未完全下沉, 上方沟壑体受扰范围广, 上下山边界角、移动角偏小, 下山方向部分受到 N1210 老采空区的影响, 其影响范围较走向有所增大; 与同矿区 N1206、N1114 工作面相比, 地表黄土层厚度均在 50~100 m, 处于同一区域, 都为湿陷型黄土梁峁沟壑地貌, 松散层力学性质差异不大, 移动变形角值因基岩厚度不同而有所差异, 但整体相近。

与其他黄土层覆盖下的张家崓 15201、大柳塔 52304 工作面煤层开采相比, 当深厚比小于 40 时地表塌陷范围扩大, 边界角相对较小; 当深厚比小于 30 时, 地表产生的非连续变形更加严重, 地表变形剧烈, 下沉盆地边缘更加陡峭, 移动角和边界角较大<sup>[13]</sup>; 移动变形角值还受到开采程度的影响, 对黄陵一矿 302、303 两工作面同时观测取得的移动角值可以看出, 采动程度较大, 地表受影响范围扩大, 故边界角偏小。

一般情况下, 采厚越大、受采程度越大、土层越软边界角越小, 黄土层越厚、采厚越大、采深越小移动角越小, 其中深厚比是决定地表移动变形形式和破坏程度的一个重要因素, 基岩厚度与性质决定形

变是否迅速传递到地表, 松散层结构是地表变形表现是否剧烈的直接因素。

### 3.4 地表移动变形动态特征

1) 下沉速度曲线。煤层开采后, 采空区上方的岩层应力状态重新分布, 随着采空区增大, 不同类型岩层相继发生垮落、下沉, 相同时间内下沉量有较大变化。根据倾向下沉数据, 绘制下沉速度曲线, 如图 5 所示。工作面推进至 840 m 时, 下沉速度曲线较前几次变化明显, 最大下沉速度陡增至 153 mm/d, 说明此时工作面已经过 B 线下方, 与开采进度相吻合。随后下沉速度逐渐增加至最大, 然后逐渐变小, 直至移动停止, 最大下沉速度可达 187.4 mm/d, 位于 B16 点。随开采的进行下沉速度逐渐减小, 直到工作面推进一定距离或开采停止一段时间后地表各点的下沉速度才会趋于 0, 总体经历了开始下沉—达到最大—逐渐减小—下沉结束的过程<sup>[20]</sup>。

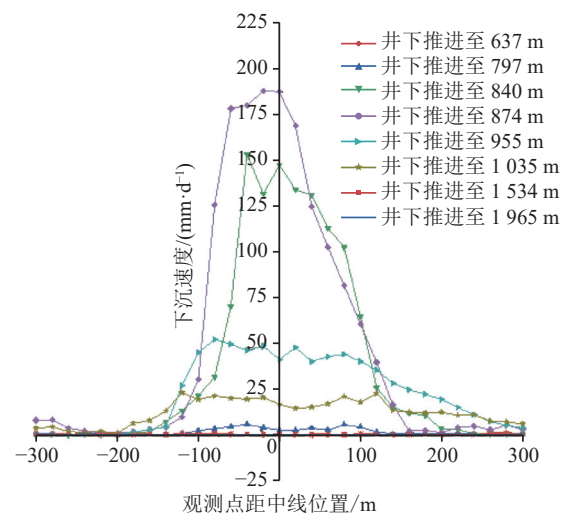


图5 倾向观测线地表下沉速度曲线

Fig.5 Surface subsidence velocity curve of inclined observation line

分析认为, 在该地质条件下, 由于上覆黄土层结构强度较小, 几乎不具有承载能力, 经过初次受采发生破坏之后, 重复采动时, 单位时间内下沉量增大, 整体表现为下沉速度较快。

2) 最大下沉速度系数。选取倾向中心点 B16 号测点作为研究对象, 将测点各次测量的下沉量及计算的下沉速度与测点相对工作面的位置关系绘制成图, 如图 6 所示。可以看出, 当工作面接近测点下方时, 下沉量开始增大, 并伴随着下沉速度增加, 当工作面越过测点一定距离后, 下沉量增加至稳定, 点的下沉速度达到最大, 随后逐渐减小到 0, 最大下沉速度与最大下沉量不同时出现。

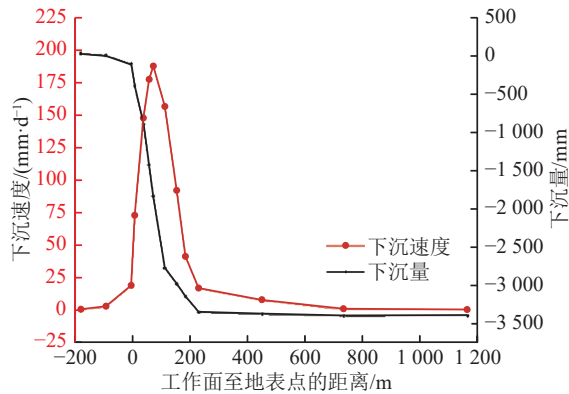


图6 倾向中心点下沉与工作面位置关系

Fig.6 Relationship between sinking of inclination center point and position of working face

最大下沉速度与采场上覆岩层岩性、工作面推进速度、深厚比、采动程度有关,覆岩岩性越软,推进速度越快,深厚比越小,则下沉速度越大。通过研究工作面推进速度与最大下沉速度的关系,根据实际生产中工作面的推进速度来计算出黄土层下地表最大下沉速度系数  $K$ 。综放开采垮落法管理顶板条件下,可采用由滕永海等<sup>[21]</sup>推导的公式进行计算:

$$K = v_{\max} H_0 / W_{\max} \sqrt{c} \quad (4)$$

式中:  $v_{\max}$  为最大下沉速度, mm/d;  $W_{\max}$  为地表最大下沉量, mm;  $c$  为工作面推进速度, m/d;  $H_0$  为平均开采深度, m。

将 N1212 工作面实际生产中工作面平均推进速度 10 m/d,  $v_{\max}$  为 187.4 mm/d,  $H_0$  取 190 m, 因此, 得到黄土层地表最大下沉速度系数  $K=3.2$ , 该值较一般煤层综放开采<sup>[22]</sup>情况大, 说明湿陷型黄土层下开采地表下沉速度增加的程度大, 具有明显的特殊性。

3)最大下沉速度滞后。如图6所示, 在地表下沉速度曲线上, 最大下沉速度点的位置总是滞后工作面一定的距离, 这种现象称为最大下沉速度滞后现象。其中最大下沉速度滞后距用  $l$  表示, 最大下沉速度滞后角是把地表最大下沉速度点与最大下沉速度时刻工作面连线和煤层在采空区一侧的夹角  $\varphi$ , 则有

$$\varphi = \arctan(l/H_0) \quad (5)$$

在上覆松散黄土层条件下, 倾向上工作面中心点 B16 的最大下沉速度时刻, 工作面推进距此点的距离为 74 m, 即滞后距为 74 m, 即该工作面的最大下沉速度滞后角  $\varphi$  为  $67^\circ$ 。由此可以看出, 黄土沟壑区 N1212 工作面地下开采过程中, 最大下沉速度滞后角较大。

分析认为在该湿陷型黄土层下, 上覆岩土体结构较弱, 在煤层工作面推进后, 顶板的下沉量很快就传到厚松散层, 并在短时间内到达地表, 沟壑地形受到严重扰动, 表现为破碎崩塌和产生大量裂隙。地表最大下沉速度点是地表移动最活跃的点, 其对于地表的破坏起到了关键作用。掌握地表最大下沉速度滞后角有助于确定在工作面回采过程中地表移动剧烈的区域, 以及最大下沉速度出现的时刻, 对进行地表沉陷修复措施具有重要意义<sup>[23]</sup>。

### 3.5 地表移动周期

若将地表移动下沉量达到 10 mm 作为开始时刻, 从刚开始到下沉速度刚达到 1.67 mm/d 的时间段作为初始期, 下沉速度大于 1.67 mm/d 的时间段作为活跃期, 下沉速度刚小于 1.67 mm/d 时起至地表各点下沉累计不超过 30 mm 时的阶段作为衰退期。对所测数据进行整理, 根据倾向线 B14、B18 以及走向中心线上 B16 观测数据, 以横坐标表示观测时间, 绘制了相应地表点下沉速度曲线  $v(t)$ 、下沉曲线  $W(t)$  以及 B16 测点点位与工作面间的相对位置关系  $I(t)$ , 如图7所示。

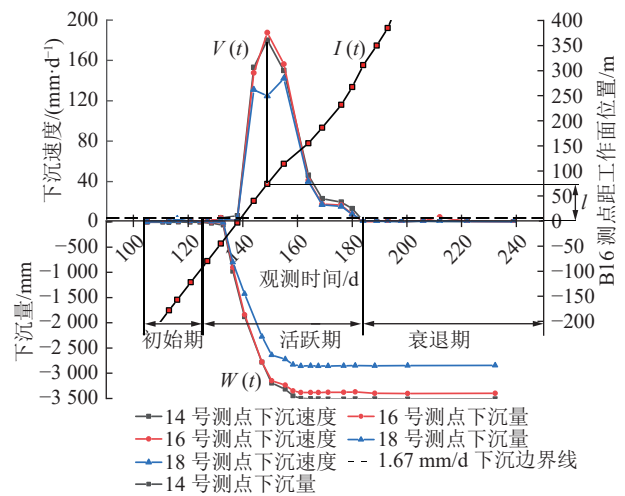


图7 B14、B16、B18号点下沉速度、下沉量与观测时间关系  
Fig.7 Relationship between sinking speed and amount of B14, B16, and B18 points and observation time

图7可以看出地表点的下沉量、下沉速度开始时缓慢增加, 当观测时间达到 130 d 左右, 下沉速度有增大的趋势, 逐渐进入变形活跃阶段; 当工作面经过地表点下方时, 即  $L > 0$  m, 其两次观测间隔仅为 6 天, 而下沉量增加迅速, 下沉速度陡增, 地表形变极为活跃; 当观测时间为 180 d 左右, 下沉速度有所减缓, 随后降至 1.67 mm/d 线下。

根据观测数据并结合图6统计各点活跃期持续时间、下沉量等特征, 见表3。各点的活跃期较短,

表3 地表点最大下沉速度及活跃期特征统计

Table 3 Statistics of maximum sinking speed and active period characteristics of surface points

观测点	最大下沉速度/(mm·d <sup>-1</sup> )	活跃期时长/d	观测总时长/d	活跃期总下沉量/mm	最大下沉量/mm	活跃期下沉量占比/%
B14	180	52	284	3 420	3 513	97.35
B16	187	51	284	3 304	3 381	97.72
B18	142	54	284	2 771	2 858	96.96

而活跃期各点的下沉量占总阶段下沉量的97%左右。由于黄土区特殊的地质条件,以及工作面较大的推进速度,加速了地表的下沉,因此地表活跃阶段形变量大,在观测时间内最大下沉速度达到了187 mm/d。

综上分析可知,湿陷型黄土区高强度开采地表移动变形具有发展快、稳定快、活跃期短的特征;初始期时间短且下沉量较小,活跃期开始后地表下沉量陡增,下沉速度与其呈正相关,下沉量大但持续时间长,地表点的下沉集中发生在活跃阶段;该湿陷型黄土层属于厚黄土层,最大厚度130 m左右,回采速度快,基岩厚度较小,地下开采导致基岩全部破断,形变传递到黄土层后能够快速到达地表,下沉盆地很快形成,并伴随着沟壑体崩塌和裂隙的出现;考虑到地表最大高差约90 m,沟壑发育,稳定性极易受外力影响,湿陷黄土受到扰动后,在雨水侵蚀、冲刷作用下,会再次产生移动破坏<sup>[24]</sup>,实际地表移动变形更加剧烈。

## 4 结 论

1)地表移动整体上符合一般的沉陷规律,变形程度有所差异,受地形和重复采动影响,地表移动更加剧烈,沉陷盆地快速形成,移动变形不连续且具有突变性,出现不均匀沉降。启动距在45~60 m,(1/4~1/3)倍平均采深,地表下沉量大,水平移动值随着采空区的不断形成以及沟壑地形变化而变化,地表最大下沉量5.25 m,最大水平移动值2.68 m,下沉系数达到0.78,重复采动系数1.33,水平移动系数为0.44,主要影响角正切值2.38,拐点偏移距为45 m。

2)基于N1212工作面沉陷特征,确定走向边界角65.9°,下山方向边界角55.6°,上山方向边界角51.7°,深厚比小于40,开采强度大、回采速度快,地表产生大量裂缝,变形剧烈,下沉盆地边缘陡峭。通过对比不同地质采矿条件下各工作面角量参数,在湿陷型黄土层下进行高强度开采,受采程度越大,采动影响越剧烈,且土层较软易受雨水侵蚀,开采影响范围广,边界角越小;一定采厚条件下,黄土层厚度越大、采深越小、危险移动范围越大,移动角越小;并分析得出深厚比是决定地表移动变形形式和破坏程

度的一个重要因素,基岩厚度与性质决定形变是否迅速传递到地表,松散层结构是地表变形表现是否剧烈的直接因素。

3)分析了湿陷型黄土层高强度开采的地表最大下沉速度以及地表点在工作面推进过程中的下沉速度,最大下沉速度为187 mm/d,并得出工作面下沉速度系数 $K=3.2$ ;最大下沉速度滞后距74 m,最大下沉速度滞后角为67°,形变传递迅速。

4)N1212工作面开采后,地表移动变形活跃期短,约为55 d,活跃期下沉量占移动周期总下沉量97%左右。湿陷型黄土高强度开采条件下,地表移动具有速度快、塌陷大、损害重的特征,活跃期短且活跃期下沉量占比大,地表移动具有明显的特殊性。综合考量地质开采条件与地表移动变形特征,合理地控制开采强度,可以有效减小地表破碎程度,进而减少水土流失。

## 参考文献(References):

- [1] 李树志,李学良,尹大伟.碳中和背景下煤炭矿山生态修复的几个基本问题[J].煤炭科学技术,2022,50(1):286-292.  
LI Shuzhi, LI Xueliang, YIN Dawei. Several basic issues of ecological restoration of coal mines under background of carbon neutrality[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 286-292.
- [2] 余学义,穆 驰,张冬冬等.厚松散层大采高开采地表移动变形规律研究[J].煤矿安全,2020,51(4):235-343.  
YU Xueyi, MU Chi, ZHANG Dongdong, et al. Study on the law of surface movement and deformation in thick loose layer and large mining height[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 235-343.
- [3] 于 洋,邓喀中.两淮矿区地表移动角值参数规律研究[J].煤炭工程,2012(5):85-87.  
YU Yang, DENG Kazhong. Study on the law of surface movement angle parameter in Lianghuai mining area[J]. Coal Engineering, 2012(5): 85-87.
- [4] 汤伏全,黄 韩,孙学阳,等.黄土沟壑区开采沉陷对地形因子的影响研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):124-128.  
TANG Fuquan, HUANG Han, SUN Xueyang, et al. The influence of mining subsidence on terrain factors in gully region of loess[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(5): 124-128.
- [5] 原 涛.陕西黄土沟壑区开采沉陷规律研究[D].西安:西安科技大学,2011.  
YUAN Tao. Study on the mining subsidence law of the loess gully



- area in Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [6] 刘义新, 戴华阳, 郭文兵. 巨厚松散层下深部宽条带开采地表移动规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 26(3): 336-340.  
LIU Yixin, DAI Huayang, GUO Wenbing. Surface movement laws of deep wide strip-pillar mining under thick alluvium[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 26(3): 336-340.
- [7] 赵兵朝, 刘 宾, 王建文, 等. 柠条塔煤矿叠置开采地表岩移参数分析[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 213-216.  
ZHAO Bingchao, LIU Bin, WANG Jianwen, *et al.* Analysis of Surface Rock Movement Parameters in Overlay Mining of Ningtiaota Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(9): 213-216.
- [8] 余学义, 施文刚, 张 平, 等. 黄土沟壑区地表移动变形特征分析[J]. 矿山测量, 2010(2): 38-40.  
YU Xueyi, SHI Wengang, ZHANG Ping, *et al.* Analysis of surface movement and deformation characteristics[J]. Mine Surveying, 2010(2): 38-40.
- [9] 余学义. 地表移动破坏裂缝特征及其控制方法[J]. 西安矿业学院学报, 1996, 16(4): 295-299.  
YU Xueyi. Feature of destructive rift by surface movement and its control method[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 1996, 16(4): 295-299.
- [10] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.  
ZOU Youfeng, DENG Kazhong, MA Weimin. Mining subsidence engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.
- [11] 赵兵朝, 刘 飞, 凡奋元, 等. 黄土沟壑区下斜交叠置开采地表下沉系数研究[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(5): 54-57.  
ZHAO Bingchao, LIU Fei, FAN Fenyuan, *et al.* Study on the surface subsidence coefficient of downslope and overlapping mining in loess gully area[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2016, 43(5): 54-57.
- [12] 汤伏全, 乔德京, 张 健. 黄土覆盖矿区黄土层湿陷性对开采沉陷的影响研究[J]. 煤炭工程, 2015, 47(6): 88-90,94.  
TANG Fuquan, QIAO Dejing, ZHANG Jian, *et al.* Study on the influence of collapsibility of loess layer in loess-covered mining area on mining subsidence[J]. Coal Engineering, 2015, 47(6): 88-90,94.
- [13] 邓喀中, 谭志祥, 姜 岩, 等. 变形监测及沉陷工程学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014.  
DENG Kazhong, TAN Zhixiang, JIANG Yan, *et al.* Deformation monitoring and subsidence engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2014.
- [14] 黄成飞. 厚湿陷性黄土层下综放开采地表移动规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.  
HUANG Chengfei. Research on surface movement law of fully mechanized caving mining under thick collapsible loess[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2011.
- [15] 陈俊杰. 风积沙区高强度开采覆岩与地表变形机理及特征研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2015.  
CHEN Junjie. High-strength mining overlying rock and surface deformation mechanism and characteristics in aeolian sand area[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2015.
- [16] 杜善周. 神东矿区大规模开采的地表移动及环境修复技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.  
DU Shanzhou. Research on surface movement and environmental restoration technology of large-scale mining in Shendong mining area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2010.
- [17] 郭佐宁. 张家峁煤矿15201综采工作面地表移动规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.  
GUO Zuoning. Study on surface movement law of 15201 fully mechanized mining face in Zhangjiamao Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [18] 王业显. 大柳塔矿重复采动条件下地表沉陷规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.  
WANG Yexian. Research on the law of surface subsidence under repeated mining conditions in Daliuta Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [19] 王 鹏. 韩家湾煤矿大采高开采地表移动变形规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.  
WANG Peng. Research on the law of surface movement and deformation in large mining height mining in Hanjiawan Coal Mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [20] 张 平. 黄土沟壑区采动地表沉陷破坏规律研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.  
ZHANG Ping. Research on the law of ground subsidence and destruction caused by mining in loess gully area[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [21] 滕永海, 唐志新, 郑志刚. 综采放顶煤地表沉陷规律研究及应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.  
TENG Yonghai, TANG Zhixin, ZHENG Zhigang. Research and application of surface subsidence law of fully mechanized caving mining[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2009.
- [22] 李德海, 许国胜, 余华中. 厚松散层煤层开采地表动态移动变形特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(7): 103-106.  
LI Dehai, XU Guosheng, YU Huazhong. Research on dynamic surface movement and deformation characteristics of thick loose seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 103-106.
- [23] 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. Dynamic surface movement characteristics of fully mechanized caving mining under thick collapsible loess[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(S1): 38-43.
- [24] 黄森林, 余学义, 赵 雪, 等. 湿陷性黄土开采损害规律及控制方法研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 35(5): 11-12.  
HUANG Senlin, YU Xueyi, ZHAO Xue, *et al.* Research on the damage law and control method of collapsible loess mining[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2006, 35(5): 11-12.