



移动扫码阅读

徐飞亚, 郭文兵, 王 晨. 浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 11–20.
XU Feiya, GUO Wenbing, WANG Chen. Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 11–20.

浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究

徐飞亚¹, 郭文兵², 王 晨³

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004; 2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003;
3. 河南佰利联新材料有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要:以西部神东矿区大柳塔煤矿为工程背景, 选取典型的浅埋深高强度开采工作面 52307 工作面为研究对象, 设立地表岩移观测站, 并结合 RTK 观测技术与三维激光扫描技术进行实时监测, 基于关键层理论和 CISPM 综合地表沉陷预计模型软件, 综合分析在浅埋深高强度开采条件影响下, 地表移动变形特征、地表岩移角值参数变化以及地裂缝发育等问题。研究结果表明: 在工作面从开切眼向前推进过程中, 地表下沉值在开切眼位置较小, 之后突然迅速增大, 下沉曲线急剧变陡, 当达到最大下沉值时, 下沉速度开始变缓; 地表移动变形主要集中在工作面中部, 工作面四周下沉变形较小, 地表移动影响范围较小; 大柳塔矿区地表岩移角值参数偏大, 基岩移动角和边界角分别达到了 87.7°和 84.1°。开采引起的地裂缝整体呈“C”字型主要分布在工作面中部; 随着工作面的不断推进, 地裂缝从开切眼位置开始继续向回风巷一侧缓慢延伸、发育并逐渐闭合, 最终形成连续包围“漏斗”型形状; 地裂缝总是滞后于工作面出现, 地裂缝滞后距与工作面推进速度呈线性增大的关系。根据地表沉陷规律及地裂缝发育分析结果得出, 在浅埋深厚煤层高强度开采条件下, 由于工作面开采强度大、推进速度快、关键层结构单一且赋存层位低, 引起顶板活动剧烈、易滑落失稳, 从而造成地表下沉盆地四周收敛快、中部破坏严重, 地裂缝发育密集。

关键词: 高强度开采; 地表沉陷规律; 地表岩移角值参数; 地裂缝; 浅埋深厚煤层

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)05-0011-10

Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam

XU Feiya¹, GUO Wenbing², WANG Chen³

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Henan Billions New Materials Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Taking Daliuta Coal Mine in Western Shendong mining area as the engineering background, this paper selected typical shallow buried high-intensity mining panel 52307 to establish the observation station for surface movement. Combined RTK technology and 3D laser scanning technology for real-time monitoring, based on key layer theory and CISPM comprehensive surface subsidence prediction model software, the characteristics of surface movement and deformation, surface movement angular parameters and surface cracks in high-intensity mining of shallow buried was studied. The results showed that with the advance of the panel from the set-up room, the surface subsidence was small at the set-up room position and then increased suddenly and rapidly. Simultaneously, the subsidence curve became steep sharply. When the maximum subsidence value was reached, the subsidence velocity tended to slow down. The surface movement deformation was mainly concentrated in the middle of the panel, while the subsidence deformation around the panel and the influence range of surface movement was small. The surface movement angular parameters were quite larger in the Daliuta coal mine area, while the bed-

收稿日期: 2022-03-05 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0821

基金项目: 国家自然科学基金(联合基金)重点资助项目(U1261207); 河南省自然科学基金资助项目(232300420337); 河南省高等学校重点科研资助项目(22B440004)

作者简介: 徐飞亚(1990—), 男, 河南驻马店人, 讲师, 博士。E-mail: 554684722@qq.com

rock movement angle and boundary angle reached 87.7° and 84.1° respectively. The surface cracks caused by mining were in an overall "C" shape, mainly distributed in the middle of the panel. Then, As the working face continued to advance, the ground fissures continue to slowly extend, develop, and gradually close from the set-up room to the tailgate side, eventually forming a continuous surrounding "funnel" shape. Ground fissures always lagged behind the working face position and the lag distance of surface cracks increases linearly with the mining speed. According to the analysis of surface subsidence law and surface cracks development, it was concluded that under the condition of high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam, due to the high mining intensity of the working face, fast advancing speed, single key layer structure and low occurrence horizon, the roof activity was intense and easy to slide and lose stability. As a result, it was appeared resulting in rapid convergence around the surface movement basin, serious damage in the middle, and intensive development of ground fissures.

Key words: high-intensity mining; surface subsidence law; surface movement angular parameters; surface cracks; shallow buried with thick coal seam

0 引言

在“压缩限制中东部、优化西部”全国煤炭开发总体布局实施背景下,新疆、陕西、内蒙古、宁夏等西北部矿区矿产储量丰富可观、矿产种类多样齐全、煤质优良易于开采,今后仍会作为我国能源供应的主要基地^[1-2]。但是,西北部矿区由于煤层埋深较浅、大采高、关键层结构单一、推进速度快等特点,在进行大规模长壁高强度开采的同时,其顶板运动剧烈、采场矿压显现明显^[3-7],对上覆岩层与地表造成的破坏也更为严重。

越来越多的学者对西部浅埋深高强度开采引起的地表沉陷规律进行了深入的研究,取得了丰硕的成果^[8-11]。王志山^[12]、谭志祥等^[13]、徐乃忠等^[14]、孙庆先^[15]通过综放高强度开采工作面地表观测实测资料得出,地表沉陷规律表现为地表最终下沉盆地呈陡峭趋势,地表沉陷变形集中且动态移动变形值大而剧烈,地裂缝发育密集。郭文兵等^[16]、陈俊杰等^[17]认为在浅埋厚煤层高强度开采条件下,地表下沉比较剧烈,地表最大下沉速度大,移动变形比较集中。李德海等^[18]、余学义等^[19]认为,在厚松散层地区煤层开采,上覆岩层破坏严重,地表呈现受采动影响敏感、下沉速度大、下沉剧烈、下沉系数大和地表移动衰退时间长等特征。任永强等^[20]总结得出,在浅埋煤层快速推进条件下,工作面双向(走向和倾向)均达到超充分采动状态,地表移动变形连续渐变,移动过程极其剧烈。张安兵等^[21-22]根据大量采空区上方地表实测资料,提出了一种基于最大 Lyapunov 指数法及混沌最小二乘支持向量机法的地表沉陷预测模型。胡青峰等^[23]指出,厚煤层开采引起的地裂缝在走向方向上呈周期性向前发育规律,其裂缝间距与直接顶来压步距基本都为 15 m,说明直接顶的周期性破断引起地裂缝的周期性发育。黄庆亨等^[24]、张

沛等^[25]通过现场观测和室内相似模拟试验,研究分析了西部神东矿区、陕北矿区等高强度开采造成的地裂缝发育特征和形成规律,认为当地表为厚砂土层时,会形成贯通型地裂缝,并建立“拱梁”结构和“弧形岩柱”结构模型,分析了地表厚砂土层的初次和周期垮落对贯通型裂缝的影响。然而,在工作面开采强度大、推进速度快的开采条件下,厚关键层结构单一且赋存层位低的岩性条件下的地表沉陷规律研究方面较少。鉴于西北部矿区高强度开采地表移动变形规律具有明显的特殊性,以及开采引起的地裂缝灾害破坏严重,需进一步的完善这部分的研究。

基于西部神东矿区大柳塔煤矿 52307 工作面的实测资料,采用多种观测技术相互验证分析,研究了在厚关键层结构单一且赋存层位低的岩性条件下,浅埋深厚煤层高强度开采条件下地表移动变形的静、动态规律和地表裂缝发育规律等问题。研究成果进一步完善补充了西北部矿区高强度开采地表沉陷规律的研究内容,并对相似矿区开采引起的地裂缝灾害问题提供了一定的借鉴意义。

1 工作面概况及观测站的建立

1.1 工作面概况

大柳塔煤矿位于陕西省神木县大柳塔镇,是神华神东煤炭集团最早规划建设、我国首个千万吨级别的特大型现代化矿井。矿井分为大柳塔井(简称“大井”)和活鸡兔井(简称“活井”)2部分,其中 52307 工作面属于大井主要可采煤层 5-2 煤层三盘区。煤层倾角较小, $1^\circ \sim 3^\circ$, 为近水平煤层;工作面走向和倾向长度分别为 4 462.6 m 和 301 m;煤层平均埋深约为 190 m,实际采高为 6.7 m。采煤方法为走向长壁后退式一次采全高。工作面两侧各有一个工作面,南侧 52306 工作面已回采结束,北侧 52501 工作面还未开始回采。工作面两侧巷道为运输巷和回

风巷,两巷宽度6 m,相邻工作面留有煤柱,宽度20 m。工作面基本顶主要为厚度很大的细粒砂岩,直接顶为粉砂岩,厚度为3.7 m,直接底以粉砂岩为主。52307工作面布置如图1所示。

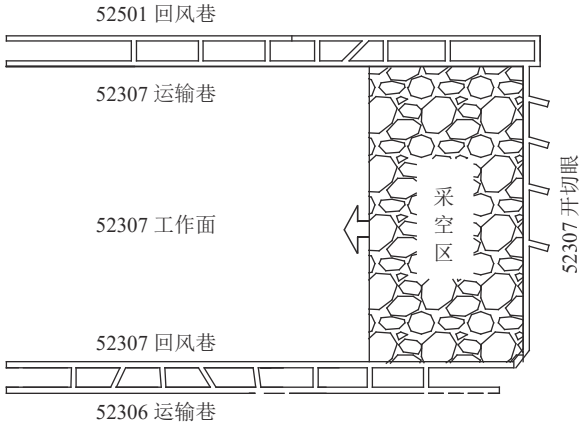


图1 大柳塔52307工作面布置

Fig.1 Layout of panel No.52307 of Daliuta Coal Mine

1.2 观测站的建立

根据图1可知,52307工作面有一相邻且回采结束的52306工作面。该工作面于2014年8月开始进行回采工作,2015年6月回采结束,2015年4月建立地表移动观测站开始进行岩移观测。52306工作面开采期间,在4月25日和6月6日之间(工作面推进290 m,即达到充分采动时)共监测25次,并在回采结束后进行了残余变形监测。监测结果显示,52306工作面最大残余下沉值在中部为26 mm、在两侧及端部小于10 mm,残余变形影响范围很小,对本次52307工作面观测结果没有影响,确保了本次观测结果的真实性和准确性。

结合工作面上方实际地形地貌特点,本次观测站布站方式为剖面线形状观测线,即在52307工作面地表上方沿工作面推进方向和垂直于工作面推进方向各布置了1条测线。其中,沿工作面推进方向上(走向方向),在工作面中央布置一条A线,共18个观测点,测点编号分别为 $A_1 \sim A_{18}$,测点间距为20 m,长度为358 m。在垂直于工作面推进方向上(倾向方向)布置一条B线,距离工作面开切眼288 m,共20个观测点,测点编号分别为 $B_1 \sim B_{20}$,测点间距为20 m,长度为380 m。为了避免相邻52306工作面残余变形的影响,在开切眼以外地表一落差为34.6 m的沟谷内设置2个控制点,分别为 G_1 、 G_2 。其中, G_1 、 G_2 控制点距离邻近52306工作面开切眼端部分别为428.5、381.4 m。观测站主要设计参数见表1,观测站布置如图2所示。

表1 地表移动观测站设计参数

Table 1 Design parameters of observation station for surface movement

参数	走向观测A线	倾向观测B线	合计
测点号	$A_1 \sim A_{18}$	$B_1 \sim B_{20}$	
测线实际长度/m	358	380	738
测点间距/m	20	20	
测点数量/个	18	20	38
控制点数量/个	2	0	2

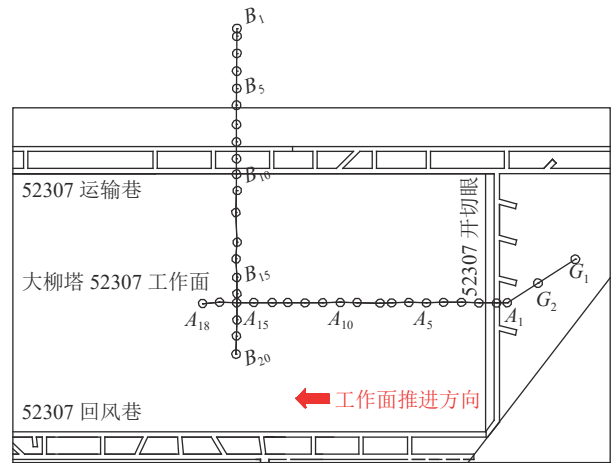


图2 地表移动观测站布置设计

Fig.2 Design layout of observation station for surface movement

1.3 观测仪器及观测方案

为准确获得地表观测点的高程坐标和平面坐标,以及工作面开采后引起的地表下沉盆地,采用RTK技术与三维激光扫描相结合的手段进行观测。其中,高程坐标采和平面坐标采用中海达H32全能型GNSS RTK系统测量,地表下沉盆地采用RIEGL VZ-400三维激光扫描系统测量,如图3所示。



(a) RTK技术

(b) 三维激光扫描技术

图3 工作面地表现场观测

Fig.3 Site observation on the surface of the panel

高程坐标和平面坐标监测方案如下:在工作面回采前布置地面观测点,并进行首次测量;由于大柳塔煤矿52307工作面属于典型的浅埋高强度开采,

工作面推进过程中地表变形和沉陷速度较大,因此在工作面开始回采至达到充分采动时(工作面推进290 m),每天观测1次;当工作面推过290 m后,每2~3 d观测1次。

三维激光扫描监测方案如下:在工作面还未开始回采,地表也未产生移动变形时观测1次,建立地表初始数字模型;工作面回采过程中地表还未达到充分采动、地表达达到充分采动时和地表达达到超充分采动时各观测1次,获得地表最终下沉盆地。

大柳塔52307工作面于2016年2月24日开始进行回采工作。2016年2月14日,工作人员在回采前进行了第1次全面观测,得到地表监测点的初始平面和高程坐标。2016-02-14—05-21(工作面从开切眼推进到500 m),采用RTK技术累计对观测线A线测量了28次,B线测量了4次;采用三维激光扫描技术对工作面地表累计测量了4次。

2 地表移动变形观测结果分析

2.1 地表下沉特征分析

52307工作面平均埋深为190 m,当工作面推进到500 m时(大于1.4倍的采深),地表在走向和倾向方向上均已达到充分采动。根据地表移动观测站实测结果,图4给出了走向方向上A测线地表下沉曲线,表2给出了工作面达到充分采动后地表最大移动变形值。

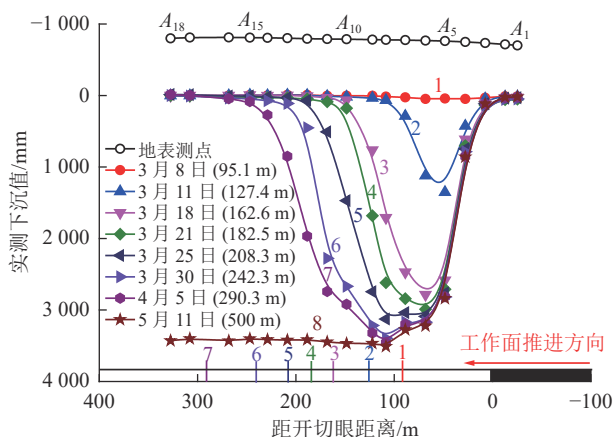


图4 走向方向上A测线地表下沉曲线

Fig.4 Surface subsidence curve of survey line A in strike direction

从图4中得出,在走向方向上,随着工作面的推进,地表下沉值逐渐增大,地表下沉范围也会相应变大,地表最大下沉值点随之前移。由图4中曲线1~2可知,2次观测时间相隔3 d,地表下沉值达到1324.6 mm,地表移动变形很快进入到开始阶段;由

表2 大柳塔52307工作面地表不同岩移角值参数
Table 2 Different angular value parameters of surface movement of panel No.52307 in Daluota

方向	边界角/(°)	移动角/(°)	充分采动角/(°)
走向	81	85	60
倾向	71	79	52

曲线3~7可知,地表移动变形达到活跃阶段,此时地表测点随着工作面的推进,在开切眼位置,地表下沉值较小,之后突然增大,下沉曲线急剧变陡,当达到最大下沉值时,下沉曲线开始逐渐变缓。最后一次观测结束时,工作面回采至500 m,此时地表已达到超充分采动状态,最大下沉值不再变化,下沉曲线呈“碗底”形状,如图4中曲线8所示。

观测结果表明,地表最大下沉值为 A_9 测点,最大下沉值为3560 mm,下沉系数为0.53。基于关键层原理^[26]可知,随着煤层的开采,基岩内会存在一层或数层对其上覆岩层活动直至地表破坏起主要控制作用的厚硬岩层,即关键层。关键层呈周期性的破断失稳会直接影响到采场上覆岩层的断裂失稳运动,从而波及到地表,引起地表沉陷、破坏,形成地裂缝等地质灾害。根据对52307工作面钻孔柱状图分析可知,其上覆岩层只有一层关键层,为第2层细粒砂岩,厚度为30.87 m,距离煤层3.7 m,属于单一近场厚关键层。在煤层开采过程中,由于采高大、工作面推进速度快,关键层和直接顶随着工作面推进位置“随采随垮”,继而影响到地表,地表移动变形剧烈,地表下沉增大。由于上覆岩层中能够控制岩层移动变形的关键层厚度大、距离开采煤层较近,在工作面推进过程中厚关键层形成了分层垮落。此时,采空区空间范围大,垮落顶板对采空区充填不充分,导致厚关键层在分层垮落时,其下位破断块体回转角过大,无法形成铰接结构而随着直接顶垮落;其上位破断块体回转空间较小,形成稳定的“砌体梁”结构。因此,原属于垮落带的关键层上位岩层转变成为了裂隙带,有效抑制了上覆岩层移动变形继续向上传递,减缓地表下沉剧烈,使得地表最大下沉值变小,下沉系数比一般的大采高工作面较小。文献^[27]指出济宁三号煤矿6.8 m大采高工作面地表下沉系数达到0.675,但是由于埋深很大(560 m以上),上覆岩层中存在多层关键层,覆岩破断后块体逐渐压实,地表移动持续时间较长,从而使得地表下沉值较大,地表下沉系数较大。

综上所述,在厚煤层高强度开采条件下,由于大采高开采造成大开采空间,上覆岩层形成“随采随垮”

的特点,地表下沉速度急剧变大,地表移动变形剧烈;由于厚关键层分层垮落复合破断的影响,覆岩破断后岩层之间存有大量细小裂隙,导致地表最大下沉值变小,下沉系数变小;地表在工作面四周开采边界下沉较小,地表移动影响范围小。

2.2 地表岩移角值参数分析

在矿井实际生产活动过程中,地表建构(筑)物保护煤柱、防水煤岩柱的留设都要基于地表岩移角值参数的选取。图5给出了走向主断面上不同岩移角值参数的相对位置关系。

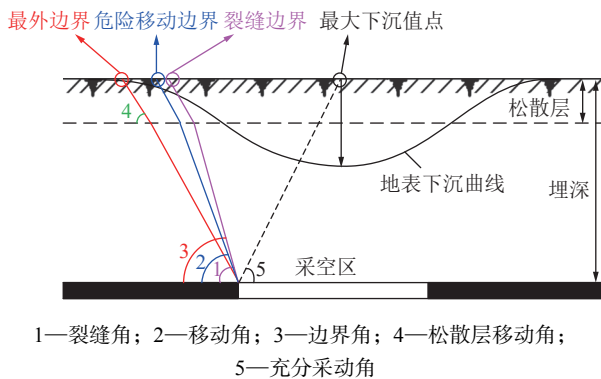


图5 走向方向上主断面地表岩移角量参数

Fig.5 Surface movement angular parameters on major section along the mining direction

根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(以下简称“规范”)规定^[28],地表岩移角值参数是描述地表移动盆地范围和大小的重要参数,主要分为边界角、移动角、裂缝角和充分采动角。

边界角、移动角和裂缝角分别都是以地表移动盆地主断面上某一个点为特征点,该特征点与采空区边界连线和水平线在煤柱一侧的夹角。

其中边界角是以下沉值为 10 mm 的点为特征点,称为边界点,如图5中的角3;移动角是以倾斜值 $\pm 2 \text{ mm/m}$ 和曲率值 $\pm 0.2 \times 10^{-3} / \text{m}$ 三个值中最外一个变形值点为特征点,称为危险移动边界点;裂缝角是以最外侧地表裂缝为特征点,称为裂缝点。

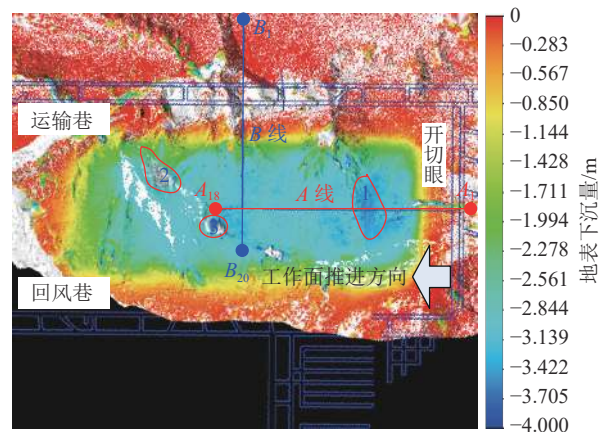
充分采动角是取地表移动盆地平底最外侧边缘点在地表水平线上的投影点为特征点,该点和同侧采空区边界之间的连线与煤层在采空区一侧的夹角。根据地表实测结果,经过计算得到大柳塔 52307 工作面地表不同岩移角值参数,见表2。

从表2中看出,在西部浅埋深厚煤层高强度开采条件下,地表岩移角值参数要比一般的中东部矿区偏大,在走向方向上边界角达到 81° ,移动角达到 85° 。说明随着工作面的快速推进,地表移动过程剧

烈,主要集中在工作面中部,而四周边界位置移动变形值较小,造成边界角和移动角偏大,使得地表移动影响范围偏小,地表出现“中部破坏严重,四周破坏轻微”的现象。

2.3 三维激光扫描结果分析

三维激光扫描技术作为现代测量学中一种高新测量技术,逐渐广泛地应用在煤矿开采沉陷区的监测中^[29-30]。为了能够得到整个工作面开采后地表的下沉盆地,采用三维激光扫描技术对工作面上方地表进行了4次扫描,分别是:①工作面还未开始回采,地表也未产生移动变形;②工作面回采距离为 144.7 m,地表还未达到充分采动;③工作面回采距离为 290 m,地表达充分采动;④工作面回采距离为 500 m,地表达超充分采动。通过后处理软件对每次扫描结果进行数据配准、点云滤波和简化,最终构建每一期的地表 DEM 数字模型。经过对比分析得到工作面动态地表下沉盆地和最终下沉盆地云图。在最后一次扫描结束后,即工作面推进到 500 m 时,地表最终下沉全盆地云图如图6所示。



1—地裂缝密集区域; 2、3—沟谷地形区域

图6 三维激光扫描地表最终下沉全盆地云图

Fig.6 Cloud image of the final surface subsidence basin with 3D laser scanning technology

由图6得出,最后一次扫描结束后,地表沿走向和倾向均已达到超充分采动状态,地表最终下沉全盆地呈类似“碗底”形状。图6右侧为下沉值色带,颜色越深表明下沉值越大,反之越小。下沉盆地中部颜色较深,下沉值较大,说明地表移动变形主要集中在工作面中部;下沉盆地最外侧为红色区域,说明在工作面开采范围以外下沉值较小,与2.1节地表岩移实际观测分析结果保持一致。受到地表地形原因的影响,下沉盆地中间沉陷区域颜色出现渐变现象,在沟谷区域下沉值变大,如图6中区域2和3下沉

值色带颜色略深;在地裂缝密集发育区域,色带颜色明显加深,说明最大下沉值发生在这一区域,最大值为3 592.1 mm。

根据上述分析可知,三维激光扫描技术在煤矿开采沉陷区的应用能够全面直观地体现工作面开采后地表移动变形特征,获得地表下沉全盆地形貌和大小,对山区沟谷地形的下沉特征及地裂缝的分布、预测和采取相应的治理措施也具有一定的指导意义。

2.4 CISPM 地表开采沉陷预计分析

地表开采沉陷预计是指在具体地质采矿条件下,选取相应的预计参数、预计模型和预计函数,对一个或多个工作面开采后研究分析地表移动变形值在时间和空间上的分布规律。该结果对开采沉陷的理论研究和矿区的实践生产都具有重要的指导意义。为验证上述地表实测结果的准确性,采用一种综合地表沉陷预测模型软件—CISPM 软件^[31]进行地表开采沉陷预计,并将预计结果和实测结果进行对比分析。该软件是在美国长壁开采工作面大量地表实测数据的基础上,利用影响函数法预计方法开发的一款预计软件,最早是在1991年由美国工程院院士

Syd S.Peng 和美国西弗吉尼亚大学 Luo Yi 教授共同提出,主要应用于近水平煤层大规模长壁开采工作面。软件分为6个板块,分别为:LWSUB(最终下沉盆地的预计)、DYNSUB(动态下沉的盆地的预计)、SUBSDNC(不规则工作面下沉盆地的预计),SURVEY(实际观测资料的处理)、SUBDED(通过实际观测资料得到最终的地表移动预计参数)、CONSULT 程序(无实际观测资料推导出最终的地表移动预计参数)。

2.4.1 地表移动变形预计参数的选取

通过实测资料的分析可得大柳塔 52307 工作面地表实测最大下沉值为 3 560 mm,最大水平移动值为 750 mm。由此可得,52307 工作面下沉系数 q 为 0.53,水平移动系数为 0.21。其余参数(拐点偏移距、主要影响角、主要影响半径)根据软件中 SUBDED 模块确定,即将大柳塔 52307 工作面倾向观测线 B 线实测下沉值点依次输入软件模块,通过回归分析得出其拟合下沉曲线以及预计参数拟合值,并与实测下沉曲线进行对比验证,曲线拟合和回归结果如图 7 所示。

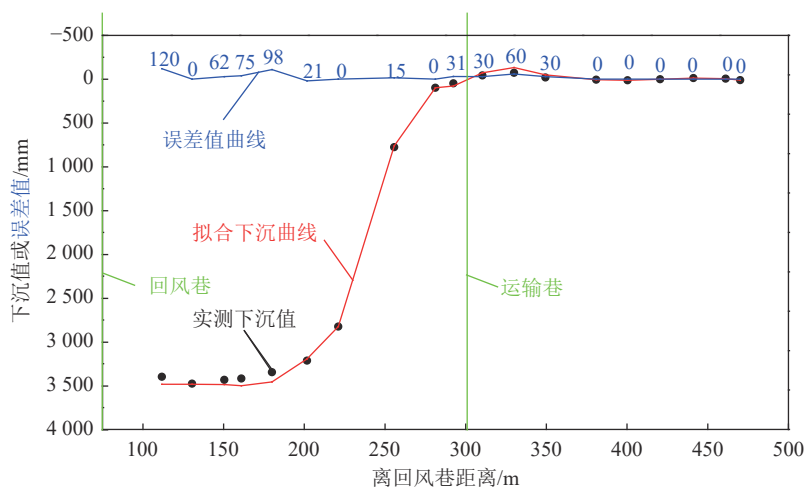


图7 大柳塔煤矿 52307 工作面预计参数回归值

Fig.7 Regression of predicted parameters of panel 52307 in Daliuta Coal Mine

根据图 7 可知,拟合曲线最大下沉值为 3 502.2 mm,与实测最大下沉值 3 560 mm 误差很小,回归系数大于 75%,表明回归结果可靠,其中拐点偏移距为 61.2 m、主要影响角为 74.8°、主要影响半径为 51.4 m。

综上所述,大柳塔 52307 工作面地表移动变形预计参数见表 3。

2.4.2 地表移动变形预计结果及分析

根据表 3 所得到的预计参数,利用软件中的 LWSUB 模块进行计算分析,得到大柳塔 52307 工作面回采到 500 m 时地表任意点的移动变形值。其中,地表下沉等值线如图 8 所示。

表 3 地表移动变形预计参数

Table 3 Predicted parameters of surface movement and deformation

下沉系数 q	主要影响角 $\tan \beta$	拐点偏距 s/m	主要影响角 $\theta/(^\circ)$	水平移动系数 b	主要影响半径 r/m
0.53	3.69	61.2	74.8°	0.21	51.4

根据图8得出,下沉等值线整体呈圆角矩形形状,说明在工作面回采结束后,地表下沉盆地整体呈“碗底”形状。地表最大下沉值发生在采空区中部区域,最大值为3556 mm。图中最外侧下沉值为10 mm等值线分布在工作面开采边界,说明边界角较大,地表影响范围很小,与三维激光扫描仪得到的地表下沉盆地地貌和实测结果相符。下沉等值线靠近工作面中部数据急剧增大,下沉速度变大,当在 A_9 测点达到最大下沉值时,不再变化,趋于一条直线,说明地表已达到超充分采动状态,与实测下沉曲线相符。

根据上述分析,将地表岩移观测实测结果、三维激光扫描结果和地表移动变形预计结果三者所得到的地表移动变形值进行对比分析,见表4。

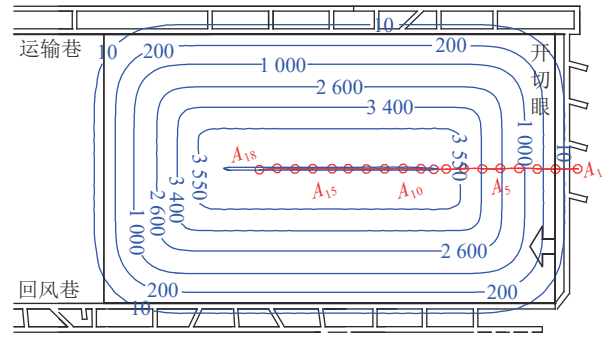


图8 地表下沉等值线

Fig.8 Contour of surface subsidence

由表4可知,3种方法得到的地表移动变形值误差很小,证明所测结果准确。

表4 地表移动变形最大值对比

Table 4 Results comparison of the maximum values of surface movement and deformation

方法	最大下沉值 W_{\max}/mm	最大倾斜值 $i_{\max}/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	最大水平移动值 U_{\max}/mm	最大水平变形值 $\epsilon_{\max}/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$
地表沉陷规律	3560.0	77.0	750.0	32.4
三维激光扫描	3592.1	78.3	776.1	33.6
地表沉陷预计	3556.0	76.5	729.4	31.5

3 地裂缝分布发育特征分析

3.1 地裂缝分布特征分析

地裂缝的形成从直观来讲,在井下开采过程中,当地表受到外来或自身的应力大于其本身所能承受的最大应力(拉伸或挤压)时,会产生不同程度的破坏,如地表的拉伸张开、挤压隆起或塌陷等现象。根据上述分析可知,大柳塔52307工作面由于埋深浅、采高大、工作面推进速度较快,工作面中部上方地表移动变形剧烈,从而形成大量的地裂缝。通过对大柳塔52307工作面不同类型地裂缝的现场观测、记录,结合矿井井上下对照图和采掘工程平面图,给出了工作面在回采结束后地裂缝分布素描图,如图9

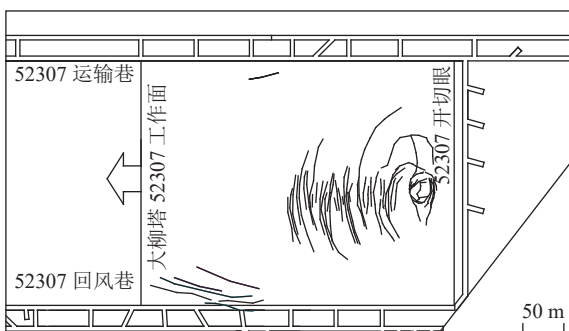


图9 大柳塔52307工作面地裂缝空间分布

Fig.9 Spatial distribution of ground fissures of panel 52307 in Daliuta Coal Mine

所示。

由图9得出大柳塔52307工作面地裂缝空间分布有以下特征:

- 1)地裂缝发育密集,主要集中在采空区中部,两侧巷道裂缝多为拉伸型张开裂缝。
- 2)工作面达到充分采动以后,地裂缝整体呈“C”形状分布在工作面中部;随着工作面的继续推进,地裂缝从开切眼位置开始继续向回风巷一侧缓慢延伸、发育并逐渐闭合,最终形成连续包围“漏斗”型形状分布在整个工作面。其中,漏斗右侧距工作面开切眼距离基本一致,约为24.1 m,相邻2个漏斗左侧间距平均为28.4 m。

3)拉伸型地裂缝长度最大可达到155.2 m,宽度最大为0.3 m;台阶型裂缝最大落差高度达到0.5 m。相邻两条裂缝间距最大为16.1 m,平均间距为5.2 m。

3.2 地裂缝发育与工作面推进速度的关系

通过分析地裂缝的现场观测记录和工作面的推进距离的关系得出,大柳塔52307工作面拉伸型地裂缝总是滞后于工作面推进位置一段距离出现,该距离记为裂缝滞后距 d ;地裂缝和工作面推进位置的连线与水平线在采空区一侧的夹角记为拉伸型裂缝滞后角 δ ,图10给出了地裂缝与工作面推进位置相对位置示意。图10中 h 为采高, H 为平均采深, s 为工作面推进度。

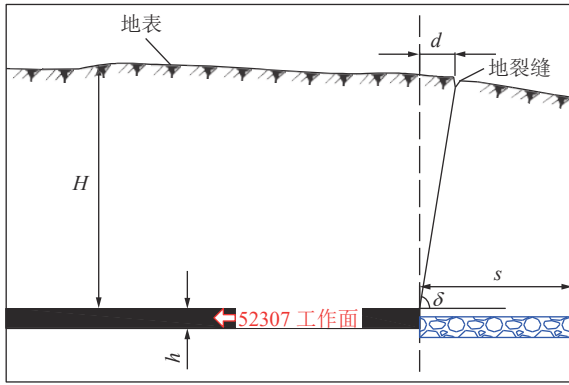


图 10 地裂缝与工作面推进位置相对位置

Fig.10 Relative location of surface cracks and the working face advancing position

基于现场实测记录,对拉伸型裂缝滞后距 d_L 、台阶型裂缝滞后距 d_T 分别与地裂缝发育当日的工作面推进速度 v 之间的关系进行了统计,结果见表 5。

表 5 不同类型地裂缝滞后距与开采速度统计结果

Table 5 Statistics of different surface cracks lag distance and mining speed

裂缝类型	监测日期	裂缝滞后距 d_i/m	工作面推进速度 $v/(m \cdot d^{-1})$
	2016-03-11	18.4	8.9
	2016-03-12	7.2	4.8
	2016-03-14	11.6	4.6
	2016-03-18	18.3	7.5
	2016-03-19	7.6	4.4
	2016-03-21	18.9	8.1
	2016-03-23	21.1	10
	2016-03-24	17	6.7
	2016-03-29	16.1	7
	2016-03-30	15	6.1
拉伸型	2016-05-12	13.8	7.6
	2016-05-13	25.1	11.6
	2016-05-14	20	9.9
	2016-05-15	22.6	11.2
	2016-05-16	15	6.65
	2016-05-17	17	8.85
	2016-05-18	22	9.8
	2016-05-19	23	8.85
	2016-05-20	33.6	13.5
	2016-05-21	29	12.7
	2016-05-22	22	11.5
台阶型	2016-03-11	27.8	8.9
	2016-03-14	10.2	4.6
	2016-03-23	38	10
	2016-03-24	13.3	6.7
	2016-03-26	15.6	7

采用 Matlab 对统计数据进行回归分析,得到了拉伸型和台阶型地裂缝滞后距与工作面推进速度之

间的关系式,分别见式(1)、(2),回归关系图如图 11 所示。

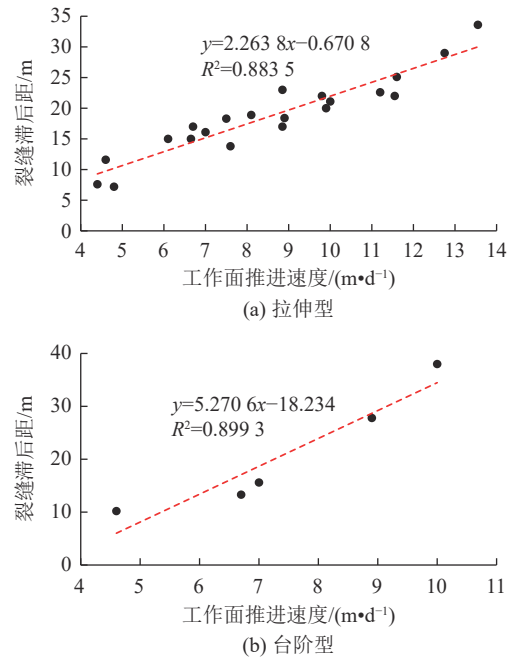


图 11 不同类型地裂缝滞后距与工作面推进速度之间的关系

Fig.11 Relationship between lag distance of different kind of surface cracks and mining speed

$$\text{拉伸型: } d_L = 2.2638v - 0.6708 \quad (1)$$

$$\text{台阶型: } d_T = 5.2706v - 18.234 \quad (2)$$

由式(1)、(2)和图 11 得出:

1)大柳塔 52307 工作面开采引起的拉伸型和台阶型地裂缝滞后距与工作面推进速度均呈线性增大的关系。由于井下开采引起的岩层裂隙向地表发育需要经过一定的时间,在工作面开采速度过快条件下,覆岩破断及围岩应力的传递会滞后于工作面推进距离,地表在工作面后方才开始出现破坏产生地裂缝。

2)拉伸型地裂缝滞后距主要分布在 15 ~ 25 m, 平均为 21 m。

3)通过对地裂缝滞后距与工作面推进速度之间的关系分析,能预测不同类型地裂缝出现的位置,进而及时采取相应的补填措施。

4 结 论

1)在浅埋深厚煤层高强度开采条件下,上覆岩层形成“随采随垮”的特点,岩层破坏带来的扰动迅速波及至地表,使得地表移动变形剧烈,很快达到最大下沉值。之后下沉曲线开始逐渐变缓,下沉速度减小。

2)地表岩移角值参数比一般的中东部矿区偏大,

其中移动角为 85° , 边界角为 81° 。说明地表移动变形主要集中在工作面中部, 工作面四周及开采范围以外地表下沉较小。当工作面回采结束后, 地表下沉盆地呈现四周收敛快、中部破坏严重的现象。

3) 不同类型的地裂缝大量发育, 整体呈“C”字型集中分布在工作面中间。地裂缝总是滞后于工作面一段距离出现, 且拉伸型和台阶型地裂缝滞后距与工作面推进速度均呈线性增大的关系。

参考文献(References):

- [1] 2020 煤炭行业发展年度报告[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2021.
- [2] 王伟东, 李少杰, 韩九曦. 世界主要煤炭资源国煤炭供需形势分析及行业发展展望[J]. 中国矿业, 2015, 24(2): 5-9.
WANG Weidong, LI Shaojie, HAN Jiuxi. Analysis of the main global coal resource countries' supply-demand structural trend and coal industry outlook[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(2): 5-9.
- [3] 杨正凯, 张金虎, 张宁. 特厚软煤大采高综放工作面成套装备技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 123-126.
YANG Zhengkai, ZHANG Jinhu, ZHANG Ning. Key technology in complete set of equipment for high cutting fully mechanized caving face in extra-thick soft coal[J]. Coal Engineering, 2020, 52(8): 123-126.
- [4] 黄庆享, 赵萌焱, 黄克军. 浅埋煤层群开采顶板双关键层结构及支护阻力研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 71-77, 86.
HUANG Qingxiang, ZHAO Mengye, HUANG Kejun. Study of roof double key strata structure and support resistance of shallow coal seams group mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(1): 71-77, 86.
- [5] 杨俊哲, 刘前进. 8.8 m超高采高工作面矿压显现规律实测及机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 69-74.
YANG Junzhe, LIU Qianjin. Analysis and measured of strata behavior law and mechanism of 8.8 m ultra-high mining height working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 69-74.
- [6] 高超, 徐乃忠, 何标庆, 等. 关键层对特厚煤层综放开采地表沉陷规律的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 229-234.
GAO Chao, XU Naizhong, HE Biaoqing, et al. Study on influence of key strata on surface subsidence law of fully-mechanized caving mining in extra-thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 229-234.
- [7] AN Yanpei, ZHANG Nong, ZHAO Yiming, et al. Field and numerical investigation on roof failure and fracture control of thick coal seam roadway[J]. Engineering Failure Analysis, 2021(1): 105594.
- [8] 王伟. 浅埋深厚煤层开采地表岩移观测分析[J]. 江西煤炭科技, 2019(3): 57-59, 62.
WANG Wei. Observation and analysis of surface rock movement in mining of shallow depth coal seam[J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 2019(3): 57-59, 62.
- [9] 李磊. 榆林矿区浅埋深厚土层薄基岩煤层开采覆岩破坏规律研究[J]. 煤矿开采, 2017, 22(3): 62-64, 103.
LI Lei. Study of overburden broken law of coal seam mining with deep and thick soil layer with shallow depth in Yulin Mine Area[J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(3): 62-64, 103.
- [10] 郭文兵, 白二虎, 杨达明. 煤厚煤层高强度开采技术特征及指标研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2117-2125.
GUO Wenbing, BAI Erhu, YANG Daming. Study on the technical characteristics and index of thick coal seam high intensity mining in coalmine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2117-2125.
- [11] 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. The rule of the overlying strata movement and their phytoremediation technology after large-scale underground mining operation in Shengdong coal mine area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2010.
- [12] 王志山. 综放高强度开采地表沉陷变形规律实测研究[J]. 矿山测量, 2018, 46(4): 69-72.
WANG Zhishan. Study on law of surface subsidence of fully mechanized caving mining with in-situ measurement[J]. Mine Surveying, 2018, 46(4): 69-72.
- [13] 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, 84(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, 84(1): 59-62.
- [14] 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.
- [15] 孙庆先. 浅埋煤层综采(综放)条件下地表移动变形特征分析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 97-102.
SUN Qingxian. Study on characteristics of shallow coal seam surface subsidence under fully-mechanized mining (top-coal caving)[J]. Coal Engineering, 2019, 51(3): 97-102.
- [16] 郭文兵, 王金帅, 李圣军. 浅埋厚煤层高强度开采地表移动规律实测研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 470-475.
GUO Wenbing, WANG Jinshuai, LI Shengjun. Surveying study on surface movement characteristics of the high intensity mining under shallow depth thick seam[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(4): 470-475.
- [17] 陈俊杰, 南华, 闫伟涛, 等. 浅埋深高强度开采地表动态移动变形特征[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 158-162.
CHEN Junjie, NAN Hua, YAN Weitao, et al. Features of surface dynamic movement and deformation caused by high intensity mining with shallow depth[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 158-162.
- [18] 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 Huahong. Study on features of surface dynamic movement and deformation caused by coal mining under thick alluvium[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(7): 103-106.
- [19] 余学义, 穆 驰, 张冬冬. 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): 235-239, 243. YU Xueyi, MU Chi, ZHANG Dongdong. Study on law of surface movement and deformation in thick loose layer with large mining height[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(4): 235-239, 243.
- [20] 任永强, 时 代. 万利矿区浅部煤层开采地表移动规律研究[J]. *矿山测量*, 2013(1): 59-61. REN Yongqiang, SHI Dai. Study on surface movement law of shallow coal seam mining in Wanli mining area[J]. *Mine Surveying*, 2013(1): 59-61.
- [21] 张安兵, 高井祥, 张兆江, 等. 老采空区地表沉陷混沌特征及时变规律研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(2): 170-174. ZHANG Anbing, GAO Jingxiang, ZHANG Zhaojiang, et al. Chaotic Characteristics and Time-Variable Law of Surface Subsidence of Goaf[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(2): 170-174.
- [22] 张安兵, 刘新侠, 高井祥, 等. 基于经验模式分解和相空间重构的采空区地表动态变形混沌性态及时变规律研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(10): 3191-3196. ZHANG Anbing, LIU Xinxia, GAO Jingxiang, et al. Law of time-dependent deformation and chaos characteristics of goaf surface based on empirical mode decomposition and phase space reconstruction technique[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(10): 3191-3196.
- [23] 胡青峰, 崔希民, 袁德宝, 等. 厚煤层开采地表裂缝形成机理与危害性分析[J]. *采矿与工程安全学报*, 2013, 29(6): 864-869. HU Qingfeng, CUI Ximin, YUAN Debao, et al. Formation mechanism of surface cracks caused by thick seam mining and hazard analysis[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 29(6): 864-869.
- [24] 黄庆享, 张 沛, 董爱菊. 浅埋煤层地表厚砂土层“拱梁”结构模型研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(9): 2722-2726. HUANG Qingxiang, ZHANG Pei, DONG Aiju. Mathematical model of “arch beam” of thick sandy soil layer movement in shallow seam[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2722-2726.
- [25] 黄庆享, 杜君武, 侯恩科, 等. 浅埋煤层群覆岩与地表裂隙发育规律和形成机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(1): 7-15. HUANG Qingxiang, DU Junwu, HOU Enke, et al. Research on overburden and ground surface cracks distribution and formation mechanism in shallow coal seams group mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(1): 7-15.
- [26] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2010. QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. *Ground pressure and strata control*[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [27] 张连贵. 兖州矿区非充分开采覆岩破坏机理与地表沉陷规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. ZHANG Liangui. *Overburden failure mechanism and surface movement law due to sub-critical extraction in Yanzhou Mining Area*[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2009.
- [28] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017. State administration for safety control and management, state administration of coal mine safety, state energy administration, state railway administration. *standard of coal pillar design and mining under buildings, water bodies, railways and main wells and roadways*[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2017.
- [29] PENG Syd S, XU Feiya. Application research of 3D laser scanning technology in monitoring subsidence area of coal mining[C]. *Proceedings of 37th International Conference on Ground Control in Mining, USA, Morgantown*, 2018: 266-273.
- [30] GU Yuanyuan, ZHOU Dawei, ZHANG Demin, et al. Study on subsidence monitoring technology using terrestrial 3D laser scanning without a target in a mining area: an example of Wangjiata coal mine, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020: 3575-3583.
- [31] PENG Syd S, Yi LUO. Comprehensive and Integrated Subsidence Prediction Model -CISPM(V2.0)[C]//*Proceedings of 3rd Workshop on Surface Due to Underground Mining*, 1992: 22-31.