

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.15

条带开采采空区覆岩移动规律数值模拟分析

杨 逾, 于洁瑜, 王 宇

(辽宁工程技术大学土木与交通学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为了准确而有效的掌握条带开采上覆岩层移动机理, 采用 FLAC3D 数值模拟软件, 对辽宁省灯塔市西马煤矿北二采区西上岗子村下压 12 煤采空区上覆岩层变形传播机理进行研究。模拟研究表明, 采用 FLAC3D 软件可以较好地模拟条带开采上覆岩层长期变形特征。通过对各采空区和煤柱顶板及对应地表布设位移测点, 得到顶板和地表不同时间段的竖向位移变化曲线。研究结果经分析得到, 煤层开采后采空区顶板在自重和上覆岩层作用下, 短时间内变形状态仍有较大变化; 开采后 21 个月, 各采空区顶板沉降变形开始趋于稳定; 24 个月后各煤柱顶板沉降变形开始趋于稳定; 27 个月后地表沉降变形开始趋于稳定; 最终, 采空区上覆岩层应力分布重新达到平衡。

关键词: 覆岩移动; 数值模拟; 变形特征; 位移测点; 应力平衡

中图分类号: TD823

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0096-06

Numerical simulation study on movement law of overlying strata of goaf in strip mining

YANG Yu, YU Jieyu, WANG Yu

(School of Civil and Transportation, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: In order to accurately and effectively control mechanism of overlying strata movement with strip mining. Using the FLAC3D to simulate the mechanism of goaf overburden deformation propagation of NO. 12 seam, which is located in NO. 2 mining area of the North of Xima Coal under the Xi Shanggangzi in Dengta, Liaoning. Simulation studies show that long-term characteristics of overburden deformation with strip mining can be simulated well by FLAC3D. By layouting displacement measuring points in the roofs of goafs and in the roofs of coal pillars as well as their own points on the surface, the vertical displacement curves of roofs and surface with different time can be obtained. The results of the research analysis is found that the deformation state changes seriously within a short time with the effect of their own gravity and overlying strata after mining. After mining, there are 21 months for the settlement deformation of goaf roofs beginning to tend stable, and 24 months for the settlement deformation of coal pillar's roofs beginning to tend stable. After 27 months, surface subsidence begins to tend stable; finally, stress distribution of goaf overburden reaches a new equilibrium. So it regains a steady state from the mining area to the surface.

Keywords: overburden movement; numerical simulation; deformation behaviour; displacement measuring point; stress balance

0 引言

地下煤层开采以后, 原岩应力平衡遭到破坏并

重新分布, 引起采空区顶板弯曲、断裂甚至塌陷。随着时间的推移, 矿区老化, 煤柱失稳破坏, 会引发采空区顶板大面积冒落, 如果处理不当, 会使上覆岩层

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(51274111); 辽宁省博士后集聚工程项目(2011921029)

第一作者: 杨 逾(1973-), 男, 甘肃张掖人, 博士, 教授, 主要从事采矿损害与控制工程。E-mail: yangyu9300@163.com

产生岩移、错动,最终导致地表大面积下沉,造成建筑物变形破坏,给矿山的安全生产带来了严重影响^[1-6]。

为了使矿山持续、稳定而安全地回收矿产资源,如何快速准确地 在采空区破坏之前,掌握采空区上覆岩层变形传播机理显得尤为关键。对大规模错综复杂的采空区稳定性进行评价是一个极为复杂的过程,然而采用数值模拟能较好的显现出采空区上覆岩层应力分布规律及变形趋势。本文采用了 FLAC3D 软件对西马煤矿北二采区村庄下 12 煤采空区覆岩移动规律进行数值模拟研究^[7],并布设了各个采空区顶板和煤柱顶板中间位置及对应地表布设位移测点,共 26 个^[8-10]。通过采集位移测点数据,得到各采空区、煤柱顶板及对应地表竖向位移随时间变化曲线,进而对采空区长期稳定性进行分析和评价。所得相应的研究成果将能够给矿区安全生产带来重要的科学指导意义。

1 工程概况

辽宁省灯塔市西马煤矿北二采区村庄下压煤区域位于井田西北部,煤层露头被侏罗系地层及第四系地层覆盖,采区范围整体形状为梯形,长 1 400 m,宽 800~1 000 m,面积约 1.26 km²。12 煤伪顶和直接顶均为厚层状海相泥岩,沉积稳定,老顶多为厚层状粉砂岩,直接底板为粘土质粉砂岩。在数值计算剖面上,按照岩类不同的力学性质对煤层顶、底板划分为 7 种岩性(表 1)。

表 1 煤岩土层岩性及力学参数
Table 1 Lithology and mechanical parameters
of coal rock stratum

岩性	弹性模量 E/GPa	泊松比 u	密度 ρ/ (kg/m ³)	粘聚力 C/MPa	内摩擦 角 φ/(°)	抗拉强度 RL/MPa
中砂岩	16.8	0.20	2.50	24.1	51.4	6.2
粉砂岩	20.0	0.21	2.30	23.0	42.0	9.4
细砂岩	15.9	0.25	2.55	18.6	40.2	9.0
泥岩	10.6	0.23	2.45	14.3	51.6	8.1
煤层	7.6	0.21	1.45	1.5	45.1	1.2
粗砂岩	15.0	0.23	2.40	19	37	4.5
表土	5.0	0.2	1.60	0.03	32	0

2 模型建立与结果分析

2.1 数值模型建立

以西马煤矿北二采区 12 煤层条带煤柱及上覆岩层为研究对象,数值计算剖面垂直采区走向,各煤

岩土层之间为整合接触,岩层内部为连续介质。模型几何尺寸沿采区走向 800 m,倾向 100 m,垂直方向 420 m。模拟煤层埋深为 400 m,厚度 2.5 m,模型顶部为自由边界,四周水平位移约束,对模型底部边界进行全约束。模型初始平衡采用摩尔-库仑模型进行计算,开挖围岩蠕变计算则利用经典粘弹性模型进行分析。

2.2 模型测点布置

在采区 7 个条带采空区顶板中间位置及对应地表布设位移测点,共计 14 个;同理,在采区 6 个条带煤柱中间位置及对应地表布设位移测点,共计 12 个,分别记录煤层开采以后上覆岩层和地表长期移动变形特征。地质剖面示意图,并标注监测点位置(图 1)。

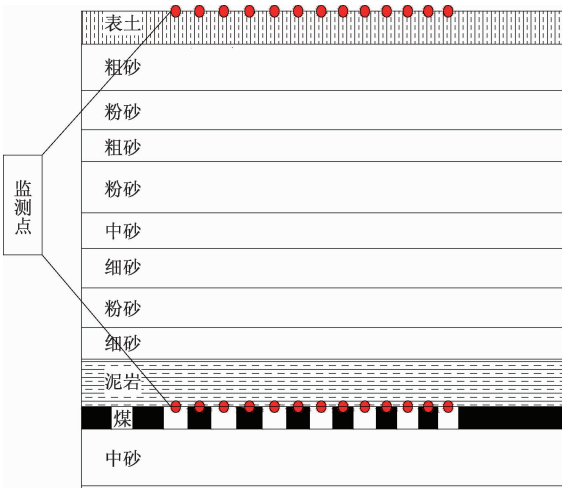


图 1 地质剖面示意图
Fig.1 Schematic geological section

2.3 模拟结果分析

2.3.1 开采覆岩移动规律

采空区采后初始上覆岩层移动变形采用摩尔-库仑模型计算移动变形分析计算。

通过模拟计算得到采后初始覆岩移动模拟结果见表 2。

根据模型计算结果,得到采动覆岩垂直方向和水平方向位移分布情况见图 2、图 3。

由图 2 分析可得,整个采区中部条带工作面 3~6 顶板沉降变形较为明显,两边的采空区 1、2 和 7(右侧为 1 采空区)顶板沉降变形相对较小,并且每个条带工作面顶板下沉区域主要集中在顶板的中间位置。由图 3 分析可得,采区 7 个条带工作面围岩水平位移变化规律基本相同,各条带工作面两端围岩及煤柱均向工作面空间产生水平位移,与采区覆岩竖向位移对比,

表 2 采后初始覆岩移动模拟结果

Table 2 Postharvest initial strata movement simulation results

测点	条带工作面 1 顶板	条带工作面 1 地表	煤柱条带 1 顶板	煤柱条带 1 地表	条带工作面 2 顶板	条带工作面 2 地表	煤柱条带 2 顶板
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-340	-12.74	-180	-9.61	-30	-11.65	-180
测点	煤柱条带 1 地表	条带工作面 2 顶板	条带工作面 2 地表	煤柱条带 2 顶板	煤柱条带 2 地表	条带工作面 3 顶板	条带工作面 3 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-180	-8.54	-370	-10.16	-180	-7.43	-40
测点	煤柱条带 2 地表	条带工作面 3 顶板	条带工作面 3 地表	煤柱条带 3 顶板	煤柱条带 3 地表	条带工作面 4 顶板	条带工作面 4 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-180	-6.34	-400	-8.15	-190	-5.34	-50
测点	煤柱条带 3 地表	条带工作面 4 顶板	条带工作面 4 地表	煤柱条带 4 顶板	煤柱条带 4 地表	条带工作面 5 顶板	条带工作面 5 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-190	-4.27	-420	-6.61	-200	-3.18	-50
测点	煤柱条带 4 地表	条带工作面 5 顶板	条带工作面 5 地表	煤柱条带 5 顶板	煤柱条带 5 地表	条带工作面 6 顶板	条带工作面 6 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-50	6.53	-200	3.29	-420	7.28	-190
测点	煤柱条带 5 地表	条带工作面 6 顶板	条带工作面 6 地表	煤柱条带 6 顶板	煤柱条带 6 地表	条带工作面 7 顶板	条带工作面 7 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-190	4.37	-50	8.32	-190	5.48	-450
测点	煤柱条带 6 地表	条带工作面 7 顶板	条带工作面 7 地表	煤柱条带 7 顶板	煤柱条带 7 地表	条带工作面 8 顶板	条带工作面 8 地表
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向
位移/mm	-180	6.57	-40	10.18	-180	7.57	-410

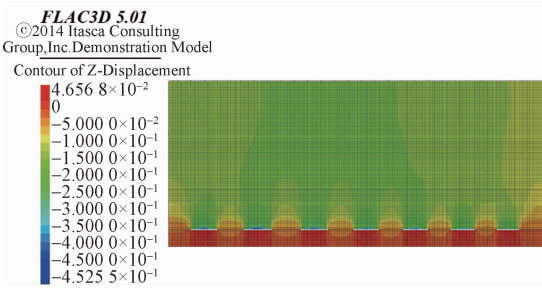


图 2 采动覆岩竖向应变模拟图

Fig.2 Vertical strain simulation diagram of the overlying strata

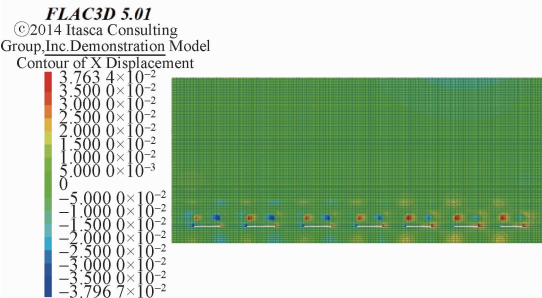


图 3 采动覆岩水平应变模拟图

Fig.3 Horizontal strain simulation diagram of the overlying strata

水平移动受条带开采影响范围相对小一些。因开采初期工作面顶板变形较大,为防止意外,应先经过试采并建立观测站定期观测,然后根据地表移动情况决定下一步的开采计划。

2.3.2 采空区覆岩蠕变变形特征

采空区覆岩蠕变模型采用的是 Burgers 蠕变模型,该模型适用于初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段。本文采用该模型计算覆岩蠕变最终的移动变形。模型在自重应力作用下的蠕变公式为:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_2} + \frac{\sigma_0}{\eta_2}t + \frac{\sigma_0}{E_1}[1 - e^{-(\frac{E_1}{\eta_1})}]$$

式中: η_1, η_2 ——黏滞性系数/(GPa/d);
 E_1, E_2 ——弹性模量/GPa。

依据 Burgers 蠕变公式,利用 Origin 软件基于最小二乘法对蠕变参数进行反演求解,得到各煤岩层的弹性模量和黏滞性系数见表 3。

表 3 煤岩层蠕变模拟参数

Table 3 Coal rock creep simulation parameters

岩性	弹性模量 E_1 /GPa	弹性模量 E_2 /GPa	黏滞性系数 η_1 /(GPa/d)	黏滞性系数 η_2 /(GPa/d)
中砂岩	6.54	23.27	34.14	28.45
粉砂岩	7.4	27.6	35.1	29.4
细砂岩	4.91	22.19	36.87	29.91
泥岩	6.12	23.01	40.41	35.74
12 煤	3.84	18.4	23.7	18.64
粗砂岩	7.13	26.7	33.51	28.41

根据蠕变模型计算结果,得到采空区上覆岩层沉降变形稳定后,覆岩垂直方向和水平方向变形分布情况见图 4、图 5。

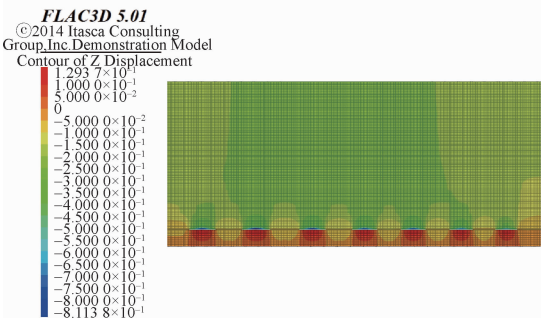


图 4 沉降稳定后覆岩竖向变形模拟图

Fig.4 Vertical deformation simulation diagram of overlying strata after settlement stability

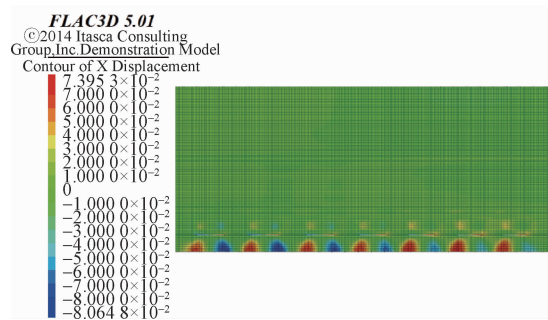


图 5 沉降稳定后覆岩水平变形模拟图

Fig.5 Horizontal deformation simulation diagram of overlying strata after settlement stability

由图 4 分析可得,采区各条带工作面围岩蠕变区域与采动覆岩移动范围大体相同。采区中部条带工作面 2~6 顶板沉降变形较为明显,两边采空区 1 和 7 顶板变形相对较小,并且每个条带工作面顶板变形区域主要集中在顶板的中间位置;同时,采区地表产生不同程度变形。由图 5 分析得到,采区各条带工作面围岩蠕变区域与采动覆岩移动范围大体相同,各条带工作面两端围岩及煤柱均向工作面空间产生较大变形,而地表水平方向变形较小。

记录采后最终覆岩移动模拟结果见表 4。

表 4 采后最终覆岩移动模拟结果

Table 4 Postharvest final strata movement simulation results

测点	条带工作面 1 顶板	条带工作面 1 地表	煤柱条带 1 顶板	煤柱条带 1 地表	条带工作面 2 顶板	条带工作面 2 地表	煤柱条带 2 顶板							
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平
位移/mm	-680	-26.35	-260	-19.45	-82	-25.24	-270	-18.68	-760	-24.56	-270	-17.89	-86	-23.45
测点	煤柱条带 2 地表	条带工作面 3 顶板	条带工作面 3 地表	煤柱条带 3 顶板	煤柱条带 3 地表	条带工作面 4 顶板	条带工作面 4 地表							
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平
位移/mm	-280	-16.42	-820	-22.25	-280	-15.64	-90	-21.67	-285	-14.54	-830	-20.35	-290	-13.08
测点	煤柱条带 4 顶板	煤柱条带 4 地表	条带工作面 5 顶板	条带工作面 5 地表	煤柱条带 5 顶板	煤柱条带 5 地表	条带工作面 6 顶板							
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平
位移/mm	-92	21.21	-290	13.15	-870	22.07	-280	14.28	-95	23.13	-280	15.03	-950	24.24
测点	条带工作面 6 地表	煤柱条带 6 顶板	煤柱条带 6 地表	条带工作面 7 顶板	条带工作面 7 地表									
方向	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平	垂向	水平				
位移/mm	-270	16.19	-90	25.48	-270	17.35	-840	26.13	-260	18.67				

2.3.3 采空区覆岩蠕变应力分布特征

根据蠕变模型计算结果,采空区条带煤柱及上覆岩层沉降变形稳定后,覆岩在水平及垂直方向应力分布情况见图 6、图 7。

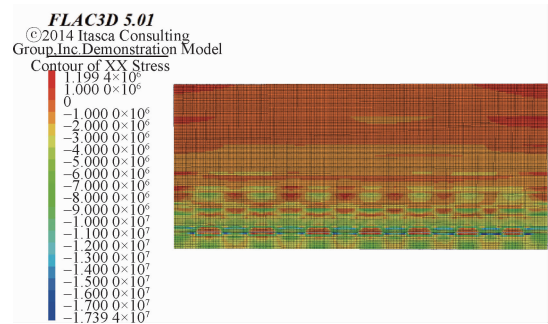


图 6 水平应力模拟图

Fig.6 Horizontal stress simulation cloud chart

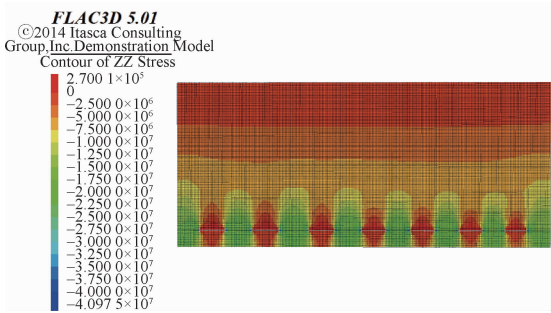


图 7 竖向应力模拟图

Fig.7 Vertical stress simulation cloud chart

著。因此,在条带开采中应严格控制开采宽度,不得随意缩小保留煤柱尺寸,一避免减少煤柱的有效支撑面积。使得煤柱安全性降低,地表下沉系数增大。

2.3.4 覆岩层长期稳定性分析

煤层开采以后,结合各采空区和煤柱顶板及对应地表位移布设测点所记录下岩移数据,得到各工作面采空区和煤柱顶板及对应地表的竖向位移随时间变化曲线(图 8~图 11)。

由图 8 分析可得,煤层开采以后,采空区顶板在自重和上覆岩层作用下,短时间内应变状态变化很大,其

由图 6、图 7 分析可得,采区各条带煤柱及覆岩移动变形稳定后,采空区顶底板应力呈拱形分布(压力拱),上覆岩层的负载只有很少一部分作用在采空区直接顶板上,大部分应力均向采空区两侧煤柱及围岩转移,在煤柱和围岩上形成应力集中区,并向直接顶底板发散,这种现象在采区中部煤柱和覆岩层上更为显

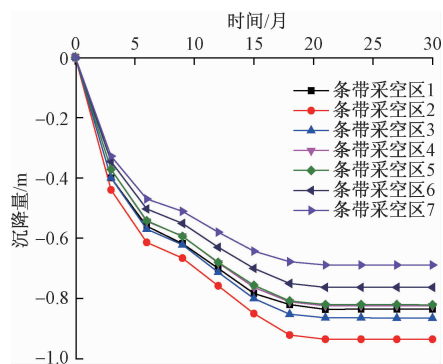


图 8 各采空区顶板竖向位移随时间变化曲线

Fig. 8 The curve of vertical displacement over time of each goaf roof

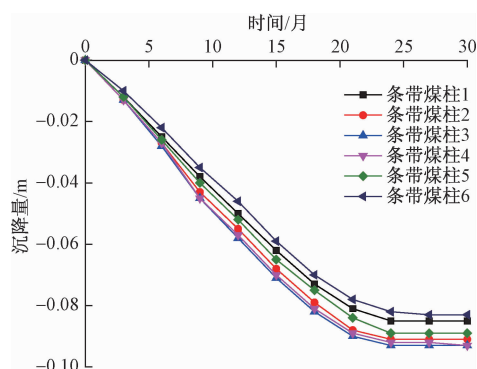


图 9 各煤柱顶板竖向位移随时间变化曲线

Fig. 9 The curve of vertical displacement over time of each coal pillar roof

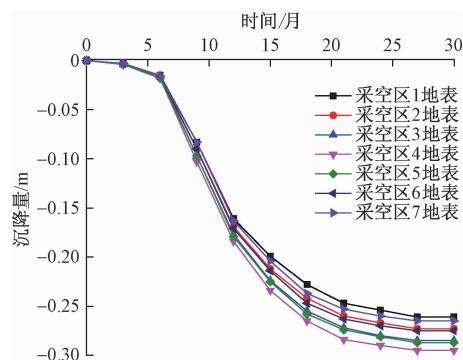


图 10 各采空区顶板对应地表竖向位移随时间变化曲线

Fig. 10 The curve of the vertical displacement over time of each goaf roof corresponding to the surface

中,采区中部 2~6 工作面采空区顶板变形量较为明显。随着时间的推移,沉降变形曲线逐渐平缓,直至开采后 21 个月沉降变形开始趋于稳定。从图 9 分析得到,由于覆岩及煤柱的约束,煤柱顶板沉降变形量较小,沉降速度较为缓慢。曲线在沉降阶段大体呈线性变化,其斜率变化区间为 $-3.9 \sim -4.7$ mm/月,至开

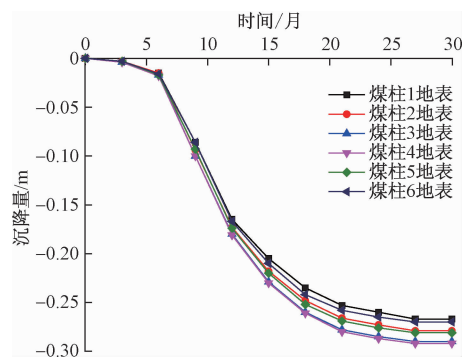


图 11 各煤柱顶板对应地表竖向位移随时间变化曲线

Fig. 11 The curve of the vertical displacement over time of each coal pillar corresponding to the surface

采后 24 个月沉降变形开始趋于稳定,采空区上覆岩层应力分布重新达到平衡。

由图 10、图 11 分析可得,各采空区及煤柱顶板对应的地表竖向位移随时间变化曲线主要分为三个阶段:第一阶段在开采后 0~7 个月,该阶段地表沉降变形较为缓慢,因为采空区覆岩移动需要通过上覆岩层形成“三带”,缓慢地传递到地表,引起地表发生沉降变形;第二阶段在开采后 7~17 个月,由于地下煤层连续开采,覆岩移动不断的传至地表,因此加快了地表沉降变形速度;第三阶段在开采后 17~27 个月,由于覆岩移动变形较为缓慢,煤层开采结束后,地表沉降变形量仍在增加,随着时间的推移,约 27 个月后地表沉降开始趋于稳定,整个采区上覆岩层应力分布重新达到平衡状态。

3 结论

本文通过使用 FLAC3D 软件对条带开采各采空区覆岩稳定性进行数值模拟研究以及蠕变模型计算,研究结果如下:

(1)煤层开采以后,采区中部条带工作面 2~6 顶板沉降变形较为明显,两边的采空区 1 和 7 的顶板变形相对较小,各条带工作面顶板变形区域主要集中在顶板中间位置;各条带工作面两端围岩及煤柱均向工作面空间产生较大变形,与覆岩垂向位移对比,水平变形范围相对小一些。

(2)各采空区覆岩及煤柱蠕变变形稳定后,采空区顶板应力呈拱形分布,上覆岩层负载只有很少一部分作用在直接顶板上,大部分应力均向采空区两侧煤柱和围岩转移,在煤柱和围岩上形成应力集中区,并向直接顶底板发散,这种现象在采区中部 2~5 煤柱条带上更为明显。

(3)在各采空区顶板和煤柱顶板中间位置及对应地表布设位移测点,通过对布设位移测点数据的采集,绘制各采空区和煤柱顶板及对应地表沉降位移随时间变化曲线,可以得到自煤层开采后,采空区顶板在自重和上覆岩层作用下,短时间内沉降变形幅度较大;开采约21个月后各采空区顶板沉降变形开始趋于稳定;24个月后各煤柱顶板沉降变形开始趋于稳定;27个月后地表沉降变形开始趋于稳定。最终,采空区上覆岩层应力分布重新达到平衡状态。

参考文献:

- [1] 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(2):196-201.
FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. In Shendong mining area shallow buried coal seam mining overlying strata movement and fracture distribution characteristics [J]. Journal of China University of Mining, 2011(2):196-201.
- [2] 杨帆,麻凤海,刘书贤,等. 采空区岩层移动的动态过程与可视化研究[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(1):84-88.
YANG Fan, MA Fenghai, LIU Shuxian, et al. Study on dynamic process and visualization of strata movement in mining area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(1): 84-88.
- [3] 王鹏. 复杂开采条件下覆岩移动和变形规律的模拟研究[D]. 太原理工大学,2010.
WANG Peng. Simulation study on movement and deformation of overlying strata under complicated mining conditions [D]. Taiyuan University of Technology, 2010.
- [4] 顾伟. 厚松散层下开采覆岩及地表移动规律研究[D]. 中国矿业大学,2013.
GU Wei. Study on mining overburden and surface movement law under thick loose layer [D]. China University of Mining and Technology, 2013.
- [5] 李春意. 覆岩与地表移动变形演化规律的预测理论及实验研究[D]. 中国矿业大学(北京),2010.
LI Chunyi. Prediction theory and experimental study on the law of deformation and evolution of overlying strata and surface movement [D]. China University of Mining and Technology (Beijing), 2010.
- [6] 陈峰. 基于数值模拟的采动影响下覆岩裂隙演化过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(2):60-65.
CHEN Feng. Analysis of the evolution process of overlying strata under the influence of mining based on numerical simulation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 60-65.
- [7] 武崇福,刘东彦. FLAC3D在采空区稳定性分析中的应用[J]. 河南理工大学学报,2007(26):136-140.
WU Chongfu, LIU Dongyan. Application of FLAC3D in stability analysis of mined out area[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2007(26):136-140.
- [8] 罗周全,秦亚光,谢承煜,等. 复杂开采环境下采场失稳垮塌过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(3):81-85.
LUO Zhouquan, QIN Yaguang, XIE Chengyu, et al. Complicated mining conditions of stope collapse process analysis [J]. Journal of Geological Hazards and Prevention of China, 2015, 26(3): 81-85.
- [9] 陈峰,潘一山,钟勇,等. 采动影响下覆岩应力变化规律的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(3):74-78.
CHEN Feng, PAN Yishan, ZHONG Yong, et al. Numerical simulation and analysis of the law of the stress variation of the overlying rock under the influence of mining [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3): 74-78.
- [10] 田小松,郑杰炳,周春蓉,等. 煤矿采空区影响程度的两种评估方法对比分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2014,25(4):59-65.
TIAN Xiaosong, ZHENG Jiebing, ZHOU Chunrong, et al. Coal mining goaf, the influence of two kinds of comparison and analysis of evaluation methods [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4): 59-65.