

渗流下不同覆岩结构长壁开采 上覆岩层运动数值分析

王云平¹, 赵德深^{1,2}, 郭东亮³

(1. 大连大学 辽宁省复杂结构体系灾害预测与防治重点实验室, 辽宁 大连 116622;

2. 大连大学 辽宁省高校重点岩土与结构工程与技术研究中心, 辽宁 大连 116622;

3. 河南省朝阳建筑设计有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 以煤矿四种不同覆岩结构在渗流作用下的开采为研讨对象, 运用数值有限元软件 ADINA 模拟分析不同覆岩岩性及其组合时采空区上覆岩层的沉降规律和地表变形规律。结果显示: 开采完成时各覆岩结构的地表均形成了完全对称的下沉盆地和反对称水平移动曲线, 开切眼和工作面正上方拐点处的下沉值均为最大下沉值的一半, 从边界到拐点处曲线的斜率逐渐增大, 从拐点到中心点曲线的斜率逐渐变小; 最大位移值因上覆岩性的不同而有所不同, 地表的最大沉降值为 3.80 m, 最小沉降值为 2.34 m; 地板的底鼓量相差不大, 最大值和最小值仅相差 0.17 mm。研究结果对其他煤矿工作面的矿压分布规律研究提供参考依据, 同时也为煤矿的安全高效开采提供一定的借鉴意义。

关键词: 不同覆岩结构; 岩层沉降规律; 地表变形规律; 渗流

中图分类号: TD325

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)01-0027-05

Numerical Analysis of Overburden Movement of Mining with Different Overlying Strata Combinations Under the Effects of Seepage

WANG Yunping¹, ZHAO Deshen^{1,2}, GUO Dongliang³

(1. Key Laboratory of Liaoning Province for Prediction & Control on Complicated Structure System, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China; 2. Key Geotechnical & Structural Engineering Research Center of University in Liaoning Province, Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China; 3. Henan Zhaoyang Architectural Design Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: Four different overburden structures mining under the action of seepage were analyzed in this paper, the finite element software ADINA was adopted to simulate the sedimentation of different lithology of overlying strata and the deformation law of surface. The results showed that when mining is completed, the surface of overlying strata structure became a completely symmetrical subsidence basin and anti-symmetric horizontal movement curve, the sinking value of open-off cut and the working face above the inflection point was as half of the maximum subsidence, the curve slope from the boundary to the inflection point increased gradually, the curve slope from the inflection point to the center point decreased accordingly. The maximum displacement varied due to overlying lithology. The surface maximum settlement value was 3.80 m, the minimum settlement value was 2.34 m. The floor heave has little difference, the difference between the maximum value and the minimum value was only 0.17 mm. The results could provide guidance for the study of the distribution law of mine pressure in the working surface of the coal mine and the safe and efficient mining.

Keywords: different overburden structure; sedimentation law of strata; deformation law of surface; seepage

随着中国发展的步伐加快,煤炭的需求量也越来越多^[1-3],然而煤矿大面积的开采必定破坏了其原始应力状态,在应力重新平衡过程中将会使得覆岩发生断裂、冒落和弯曲^[4-7]进而引发地面沉陷、建筑物倒塌等一些灾害现象,严重危及了人的生命^[8-10]。因此,研究煤层开采过程中不同覆岩组合上覆岩层的运动变化情况,不仅是矿井安全生产的关键,更是地表沉陷治理的基础^[11]。因 ADINA 有限元软件有网格划分自由、节点数多、处理简便完备等优点,便于应用于煤矿开采中的灾害预测与防治^[12-14]。所以本文运用 ADINA 有限元软件模拟分析比较不同覆岩结构开采上覆岩层运动和破坏的规律,为回采工作面矿压分布规律研究提供参考依据,同时也为煤矿的安全高效开采提供保障^[15-17]。

1 工程概况

煤层走向大体呈北西方向,岩层倾斜平缓,一般在 7°~9°间,由 48 个拐点圈定,矿区南北长 8.69 km,东西倾斜宽 3.29 km,面积为 28.5671 km²。不同

工作面的上覆岩岩性结构有坚硬—坚硬型、软弱—坚硬型、坚硬—软弱型、硬软交替型等。为了减少开采深度、采厚、煤层倾角、地表水深等因素对不同覆岩力学模型的影响,因此将开采条件统一如下:开采深度 $H=733$ m,煤层采出厚度 $M=9$ m,倾向长度 $L=120$ m,走向长度 $D=1\,200$ m,煤层倾角 $\alpha=7^\circ$,地表水库水深取最大水深 5.58 m。煤岩物理力学和水力学参数见表 1,所需流体的体积模量为 2.3 GPa,流体密度为 1 000 kg/m³。其中四种工况的覆岩岩性结构组合依次为:坚硬—坚硬型: R1 + R2 + R3 + R14 + R5 + R14 + R7 + R9 + R8 + R7 + R9 + R8 + R11 + R13 + R12 + R11; 软弱—坚硬型: R1 + R2 + R7 + R8 + R7 + R9 + R7 + R11 + R2 + R15 + R15 + R17 + R19 + R13 + R12 + R11; 软弱—坚硬型: R1 + R2 + R4 + R15 + R18 + R18 + R16 + R6 + R6 + R5 + R6 + R8 + R10 + R13 + R12 + R11; 软弱—坚硬型: R1 + R2 + R20 + R17 + R21 + R15 + R21 + R18 + R21 + R7 + R9 + R15 + R10 + R13 + R12 + R11。

表 1 煤岩物理力学、水力学参数

编号	岩性	E /GPa	ν	ρ /(g·cm ⁻³)	ϕ /(°)	c /MPa	σ_1 /MPa	孔隙率	渗透系数 /(m ³ ·d ⁻¹ ·kg ⁻¹)
R1	第四系	0.83	0.36	2.09	31.7	0.60	0.60	0.42	1.32×10 ⁻⁵
R2	砂岩	2.55	0.25	2.25	39.0	1.76	1.02	0.30	5.29×10 ⁻⁶
R3	砂岩	5.63	0.27	2.29	38.0	3.90	3.12	0.32	5.29×10 ⁻⁶
R4	砂岩	3.00	0.28	2.22	46.0	3.90	0.89	0.32	5.29×10 ⁻⁶
R5	砂岩	5.00	0.28	2.22	46.0	3.90	3.69	0.32	5.29×10 ⁻⁶
R6	砂岩	8.26	0.34	2.29	46.0	1.58	1.36	0.32	5.29×10 ⁻⁶
R7	砂页岩	8.43	0.34	2.29	46.0	15.80	6.81	0.17	3.20×10 ⁻⁸
R8	砂页岩	8.43	0.34	2.43	37.0	3.95	4.29	0.16	3.00×10 ⁻⁸
R9	砂页岩	8.44	0.34	2.53	41.0	15.00	5.31	0.17	3.10×10 ⁻⁸
R10	砂页岩	7.78	0.33	2.16	41.8	5.75	4.31	0.17	3.10×10 ⁻⁸
R11	砾岩	11.94	0.33	2.39	42.4	7.60	6.57	0.30	8.00×10 ⁻³
R12	砾岩	4.05	0.26	2.39	32.0	5.12	4.06	0.30	8.00×10 ⁻³
R13	煤层 1	1.10	0.29	1.30	39.8	0.20	0.22	0.40	2.64×10 ⁻⁵
R14	粉砂岩	5.63	0.27	2.29	38.0	3.90	3.12	0.21	9.30×10 ⁻¹¹
R15	泥岩	2.55	0.33	2.23	38.0	0.90	0.62	0.40	8.81×10 ⁻⁹
R16	泥岩	2.25	0.27	2.47	38.0	1.90	0.87	0.40	8.81×10 ⁻⁹
R17	砂泥岩	2.70	0.33	2.47	38.0	1.50	1.02	0.16	8.78×10 ⁻⁸
R18	砂泥岩	2.55	0.25	2.25	39.0	4.40	1.02	0.16	8.78×10 ⁻⁸
R19	油页岩	2.25	0.33	2.16	41.8	0.23	0.87	0.15	3.53×10 ⁻⁶
R20	砾岩	8.26	0.34	2.29	46.0	1.58	6.36	0.30	8.00×10 ⁻³
R21	砾岩	8.13	0.34	2.29	37.0	3.75	5.31	0.30	8.00×10 ⁻³

2 模型的建立

2.1 几何尺寸

煤层开采深度 $H = 733\text{ m}$,采厚 $M = 9\text{ m}$,工作面走向长度 $D = 795\text{ m}$,煤层倾角 $\alpha = 0^\circ$,地表水库水深 5.58 m ,为消除边界影响,左右各取 280 m 、底部取 200 m 作为边界影响区。最终不同覆岩结构的数值模型尺寸统一如下: $Y \times Z = 1\,355\text{ m} \times 802\text{ m}$, Y 为走向, Z 为深度方向。每次推进 15 m ,依次推进 795 m 结束,共模拟 15 组岩层,1 层煤层,1 层地表水,17 个单元组,5 994 单元,6 234 节点。图 1 为计算模型示意图。

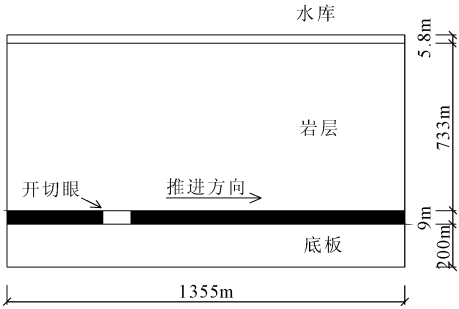


图 1 煤矿工作面示意图

2.2 边界条件

模型边界条件包括力学边界条件、渗流边界。力学边界:左右边界施加水平约束,水平位移为零;底部边界固定,水平和竖直位移均为零。渗流边界条件:模型左右边界和底部边界设置为不透水边界,在第四系与潜水接触面设置流固耦合边界,水库表面为自由面。

2.3 屈服准则和覆岩破坏判据

屈服准则采用 Mohr – Coulomb 屈服准则。把 $\sigma_1 > \sigma_l$ 作为覆岩发生的破坏判据。

3 数值模拟与分析

3.1 覆岩垂直位移场的分析

煤层开挖引起了覆岩的应力重分布,在应力平衡的过程中,会发生采空区上方岩体下沉以及煤层底板隆起等岩层移动,但上述岩层移动的大小会因上覆岩岩性的大小而有所不同。图 2 ~ 图 3 分别表示工作面推进 135 m、405 m 时不同覆岩模型垂直位移场的分布。从中可以看出:顶板的下沉量因上覆岩层的岩性不同有着较大的差异,一般复合岩性的地层下沉量较均匀岩性地层下沉量大,而底板的上鼓量则基本相同。

(1) 图 2 表示开挖工作面推进 135 m 时垂直位

移场的分布,从图 2 可以看出:回采扰动均导致上覆岩层发生较明显的下沉,且工作面的开采都已经开始波及地表,形成下沉盆地。顶板的下沉量因上覆岩性的不同有较大的差异,顶板的下沉量从大到小依次为:软弱—坚硬型为 0.88 m、坚硬—软弱型为 0.84 m、硬软交替型为 0.72 m、坚硬—坚硬型为 0.64 m。上覆岩性不同对地板的上鼓量影响较小,各覆岩结构的底鼓均为 12 cm 左右。

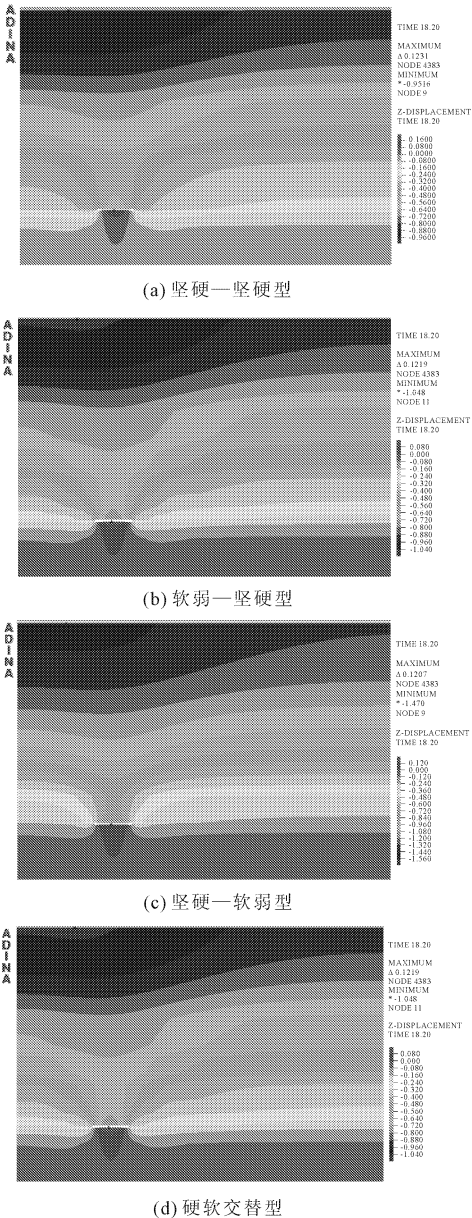


图 2 煤层工作面推进 135 m 时不同覆岩模型垂直位移场分布图

(2) 当开挖工作面推进 405 m 时,垂直位移场的分布如图 3 所示:随着煤层向前开挖,回采扰动影响加剧,覆岩整体下沉量急剧增大,位移等值环状云图拱顶均已发育到地表,引起土层整体变形。顶板

下沉量的相对大小关系与工作面推进 60 m 时的规律相同,顶板的下沉量从大到小依次为:软弱—坚硬型为 3.5 m、坚硬—软弱型为 2.9 m、硬软交替型为 2.1 m、坚硬—坚硬型为 1.67 m。底板的底鼓量相差不大:坚硬—软弱型最大为 19.26 mm,软弱—坚硬型最小为 18.09 mm,底板底鼓的最大值和最小值仅相差 0.17 mm。

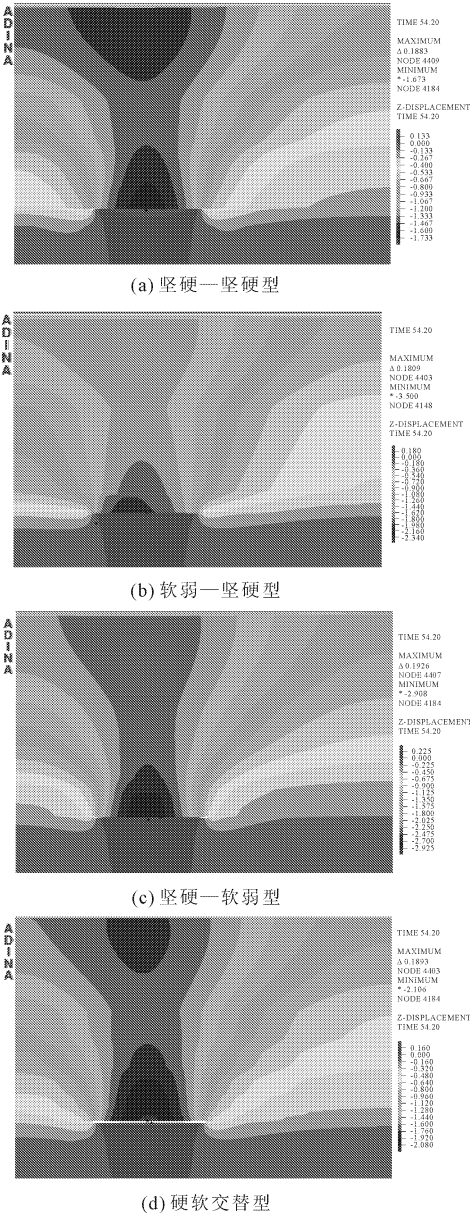


图 3 煤层工作面推进 405 m 时不同覆岩模型垂直位移场分布图

(3) 当开挖工作面推进 795 m 时模拟结束,此时的位移分布规律为:不同覆岩结构模型基本以采空区中央轴为轴对称分布,在坚硬—软弱型覆岩结构中,当下方硬岩弯曲后,由于上方的软岩层失去下方硬岩层的支撑,在硬岩层与其上覆的软岩层

间不出现离层现象而是同步产生弯曲下沉;在软弱—坚硬覆岩结构条件下,其下方的软岩弯曲下沉后,由于上方硬岩自身的强度支撑作用,上方硬岩层不与软岩层呈现整体性运动,而是在两者交界面处产生离层。顶板的下沉量从大到小依次为:软弱—坚硬型为 7.522 m、坚硬—软弱型为 7.029 m、硬软交替型为 6.390 m、坚硬—坚硬型为 5.085 m。底板的底鼓量相差不大,从大到小依次为:坚硬—坚硬型为 21.49 mm、硬软交替型为 19.91 mm、坚硬—软弱型为 19.85 mm、软弱—坚硬型为 19.42 mm,最大值与最小值仅相差 0.17 mm。

3.2 地表变形分析

图 4 表示开采完成时,即煤层走向推进 795 m 时水库和第四系相接的不同覆岩结构的地表沉降量。由图 4 可见:开采完成后各覆岩结构的地表均形成了对称的下沉盆地,开切眼和工作面正上方拐点处的下沉值均为最大下沉值的一半,从边界到拐点处曲线的斜率逐渐增大,表示下降的幅度逐渐增大;从拐点到中心点曲线的斜率逐渐变小,表示下降的幅度逐渐变小。回采区段中心上方最大沉降值因上覆岩性的不同而有所不同,下沉量从大到小依次为:软弱—坚硬型为 3.80 m、坚硬—软弱型为 3.29 m、硬软交替型为 2.85 m、坚硬—坚硬型为 2.34 m。可见,在其它条件相同时,采空区上方地表的沉降值随着上覆岩层的硬度增加而逐渐减小,其中坚硬—坚硬型结构对地表稳定是最有利。

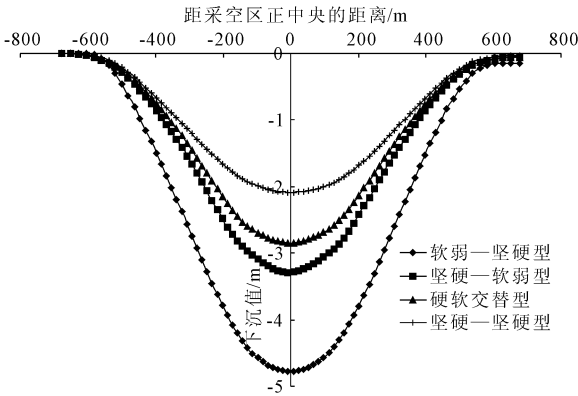


图 4 开采完成时不同覆岩结构的地表沉降曲线

图 5 表示开采完成时,水库和第四系相接的不同覆岩结构的地表水平变形图,由图 5 可见:工作面开采完成后各覆岩结构的地表均形成了反对称的水平移动曲线,回采区段中心正上方地表点的水平移动值并不因上覆岩性结构的变化而变化,其大小一直为 0,沉降曲线中拐点对应的水平位移最大。最大水平位移值因上覆岩性的不同而有所不同,下沉

量从大到小依次为:下软上硬覆岩结构为 0.62 m、下硬上软覆岩结构为 0.55 m、硬软交替覆岩结构为 0.49 m、硬硬覆岩结构为 0.43 m。相应的最大倾斜为 3.12 mm/m、2.77 mm/m、2.47 mm/m、2.16 mm/m。可见,其它条件相同的情况下,回采区段中心正上方对应的地表点水平变形为零保持不变,其两侧地表点的水平变形随着上覆岩层的硬度增加而逐渐减小,其中上硬下硬的岩层结构类型对地表稳定是最有利的。

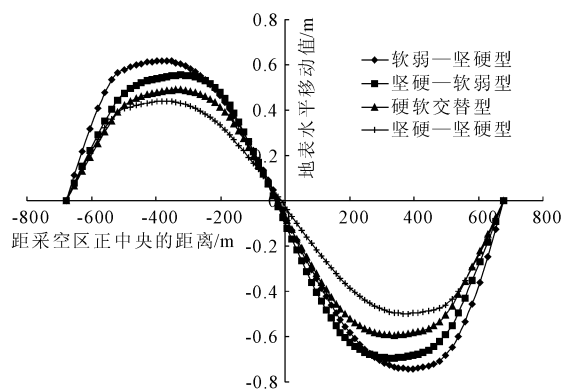


图5 煤层开采完成时不同覆岩结构的地表水平变形图

4 结 论

(1) 采空区开挖和渗流共同作用下导致的顶板的下沉量因上覆岩层的岩性不同有着较大的差异,在其他条件下相同时,顶板的下沉量从小到大依次为:下软上硬覆岩结构、下硬上软覆岩结构、硬软交替覆岩结构和硬硬覆岩结构。

(2) 底板的底鼓量相差不大,工作面推进 405 m 和 540 m 时,各不同覆岩结构底鼓的最大值和最小值仅相差 0.17 mm。

(3) 开采完成时,采空区上方地表均形成了对称的下沉盆地和反对称的水平变形曲线,最大沉降值和最大水平变形值因上覆岩性的不同而有所不同。最大下沉量从大到小依次为:软弱—坚硬型结构为 3.80 m、坚硬—软弱型结构为 3.29 m、硬软交替型结构为 2.85 m、坚硬—坚硬型结构为 2.34 m。

(4) 最大水平位移从大到小依次为:软弱—坚硬型结构为 0.62 m、坚硬—软弱型结构为 0.55 m、

硬软交替型结构为 0.49 m、坚硬—坚硬型结构为 0.43 m。

参考文献:

- [1] 宋洪柱.中国煤炭资源分布特征与勘查开发前景研究[D].北京:中国地质大学(北京),2013.
- [2] 方行明,杨锦英,郑欢.中国煤炭需求增长极限及其调控[J].经济理论与经济管理,2014(12):63-73.
- [3] 吴金梅.大、中城市煤炭流通趋势分析[D].北京:中国社会科学院研究生院,2000.
- [4] 张金虎,吴士良,周茂.不同覆岩结构短壁开采上覆岩层运动的数值分析[J].西安科技大学学报,2011,31(3):263-266.
- [5] 郭晓强,窦林名,陆菜平,等.覆岩主关键层断裂规律研究[J].矿业安全与环保,2011,38(1):23-26.
- [6] 郑汝育,吴侃,蔡来良.覆岩弯曲带动态沉陷规律的相似材料模型研究[J].煤炭工程,2010(8):62-65.
- [7] 梁天书,梁天灵,于海生.开采引起的覆岩冒落及地表沉陷的机理与防护[J].中国安全生产科学技术,2007,3(3):69-71.
- [8] 邱风,朱勋.中国煤炭行业安全问题及监管对策研究[J].当代经济管理,2007,29(4):57-60.
- [9] 彭林军,赵晓东,宋振骥,等.煤矿顶板透水事故预测与控制技术[J].西安科技大学学报,2009,29(2):140-143,153.
- [10] 陈娟,赵耀江.近十年来我国煤矿事故统计分析及启示[J].煤炭工程,2012(3):137-139.
- [11] 陈斌.城市隧道施工引发的地表沉陷机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [12] 王小虎.ADINA 有限元建模中特征建模技术应用分析[J].四川地质学报,2011,31(4):438-441.
- [13] 王婉叶.ADINA 前处理程序的二次开发[D].兰州:兰州理工大学,2011.
- [14] 王亚军,王峰,李约翰.有限元分析系统在结构计算中的比较及展望[J].基建优化,2003,24(4):50-52,54.
- [15] 于元林.大采高孤岛采场覆岩运动破坏特征和矿压显现研究[D].淮南:安徽理工大学,2007.
- [16] 陈莹.同忻煤矿地质动力环境分析与矿压显现规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012.
- [17] 王方田.浅埋房式采空区下近距离煤层长壁开采覆岩运动规律及控制[D].徐州:中国矿业大学,2012.