

深部大采宽开采条件下地表沉陷的 数值计算分析

袁越^{1,2*}, 李树清^{1,2}, 赵延林^{1,2}, 朱永建³, 王卫军^{1,2,3}

(1.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;

3.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究深部大采宽条带开采条件下,采深、采高对下沉系数及地表移动变形的影响,以某矿十采区为工程原型,采用大型三维有限差分程序FLAC^{3D}建立了不同采深、采高的10个计算模型,并对模拟结果进行了拟合计算和对比分析.结果表明:沉陷盆地水平移动的正负拐点分别偏向两侧的煤柱,随采深的加大,偏移距离有所增大,说明地表变形范围有向外扩展的趋势.地表最大变形随着采深的增加线性减少,而随着采高的增大线性增加;地表下沉系数与采深呈线性递减的关系,而与采高则呈非线性衰减的关系.在满足允许地表变形情况下,可适当提高开采厚度,充分解放建筑物下的压煤量.

关键词:深部矿井;条带开采;大采宽;地表沉陷;数值计算

中图分类号:TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2017)03-0001-06

Analysis of Numerical Calculation on Ground Subsidence in Deep Mining with Large Mining Width

Yuan Yue^{1,2}, Li Shuqing^{1,2}, Zhao Yanlin^{1,2}, Zhu Yongjian³, Wang Weijun^{1,2,3}

(1. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the influence of mining depth, mining height to sinking coefficient, surface movement and deformation under the condition of deep large mining width by strip mining, ten calculation models with different mining depth, and different mining heights are constructed by FLAC^{3D}. Then, the simulation results are calculatedly fitted and comparatively analyzed. Results show that the positive and negative inflection points of horizontal movement in subsidence basin move respectively to both sides of the coal pillars, and the offset distance increases with the increase of mining depth, which shows that the scope of surface deformation has the outward expansion trend. The maximum surface deformation increases linearly with the increase of the mining height as the increase of the mining depth linearly reduced. The coefficient of surface subsidence and mining depth decrease linearly, and the mining height shows a nonlinear attenuation relationship. The mining thickness may be appropriately improved to fully liberate coal deposit under buildings if the allowed surface deformation meets the requirements.

Keywords: deep mine; strip mining; large mining width; ground subsidence; numerical calculation

收稿日期:2017-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51434006;51504091;51374106);湖南省教育厅一般科研资助项目(15C0551)

*通信作者,E-mail:yuanyuekafu@163.com

随着对能源需求量的增加和开采强度、规模的不断加大,浅部资源日益减少.近年来,国内外矿山都相继进入深部开采状态,我国煤矿开采深度以 9 m/a 的速度增长,东部已有不少矿井的开采深度超过 1 000 m.随着矿井采深的增加,岩体所处的地质力学环境变得更为恶劣,造成岩体组织结构、力学行为特征和工程响应与浅部岩体相比均发生了根本性变化,由此引起的岩层移动和地表变形预测及控制等问题变得更加复杂^[1,2].

据不完全统计,我国建筑物下压煤量达 87.6×10^8 t,占整个“三下”压煤量的 66%^[3].作为解决建(构)筑物、村庄下采煤的主要技术途径,条带开采能够有效地控制上覆岩层移动和地表过大的有害变形,实现地表建(构)筑物及矿区环境的保护,因此,应用最为广泛.进入深部矿井开采后,由于宽深比较小,属于极不充分采动,传统的地表沉陷预计模型及参数确定方法已不再适应^[4,5];另一方面,为了充分解放建筑物下的压煤,采用大采宽、大留宽进行条带开采,此时,基于小尺寸的条带开采地表沉陷预测方法已不适合.深部大采宽条带开采条件下,关于采深、采高及下沉系数对地表沉陷的影响,研究的尚不够充分.文献[6]应用 FLAC^{3D}对车集煤 24 采区深部宽条带开采地表沉陷进行了预计,并与修正后的概率积分法预计结果进行了对比.文献[7]通过数值模拟得出了条带开采下不同采深地表最大下沉、水平拉伸变形与采出率的函数关系.文献[8]研究结果认为在采深和采出率等条件相同的情况下,地表下沉值和水平移动值均随采厚的增加而增大,而下沉系数随采厚的增加以非线性关系逐渐减少.本文借助三维大变形有限差分程序 FLAC^{3D}对深部矿井大采宽条带开采条件下,不同大采深、采高地表沉陷特征进行数值计算,分析下沉系数与采高、采深的关系,为深部大采宽条带开采设计优化提供一定的科学依据.

1 数值计算模型及模拟方案

1.1 计算模型及参数

本次数值模拟以沈北矿区某矿十采区为工程背景,其上方地表建筑物密集,采用宽条带开采,开采对象为褐煤,设计开采深度为+50~-900 m,开拓方式为片盘斜井.该区域地层较为简单,由老至新为前震旦系,震旦系,老第三系,第四系.煤层顶板以泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩为主,底板多为中砂岩和泥质砂岩.上覆岩层以砂岩和泥质砂岩为主,第四系表土厚度为 150 m,由粘土、砂层与砂质粘土组成.

采用三维有限差分非线性大变形程序 FLAC^{3D}建立三维数值计算模型及进行计算分析.模型 x 轴方向为煤层倾向, y 轴方向为煤层走向, z 轴为重力方向,整个模型范围为长 \times 宽 \times 高=2 000 m \times 2 000 m \times 720 m,共划分 198 400 个单元,209 953 个节点.煤层近似水平,埋深 700 m,共布置 2 个条带,采宽为 300 m,留宽 200 m,条带设计长度 1 000 m,模拟条带开采时采用分部开挖,开挖步距为 50 m,每个条带开采共需计算 20 个开挖步.模型侧面限制水平移动,底部固定,模型上表面为自由边界,计算中煤岩体采用 Mohr-Coulomb 强度准则.所构建的三维数值模拟计算模型如图 1,开采条带平面布置示意图如图 2,计算所采用的物理力学参数见表 1.

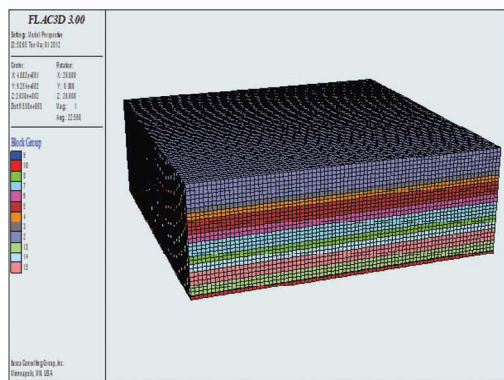


图 1 数值计算模型及网格划分

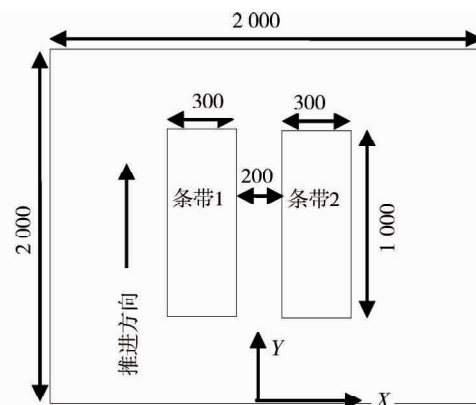


图 2 开采条带平面布置

表 1 煤岩层物理力学参数

岩性	编号	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	粘聚力/MPa	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
砂土	2	0.5	0.40	0.3	21	0.30
泥岩	3	3.0	1.40	1.5	29	0.20
粉砂质泥岩	4	3.1	1.60	1.3	30	0.32
中砂岩	5	3.2	1.50	0.6	35	0.45
细砂岩	6	3.4	1.60	1.6	30	0.20
粉砂岩	7	3.5	1.70	1.7	32	0.20
泥质粉砂岩	8	3.1	1.20	1.4	31	0.18
细砂岩	14	3.3	1.50	0.4	34	0.35
砂泥互层	15	3.1	1.50	1.8	30	0.25
粉砂岩	13	3.5	1.60	1.6	30	0.30
煤层	9	1.0	0.55	0.6	20	0.10
中砂岩	10	3.3	1.60	0.6	35	0.50

1.2 模拟方案

为了研究深部大采宽条件下不同采深、不同采高地表的沉陷特征及其对下沉系数的影响,并确立采深、采高与下沉系数之间的函数关系,为深部开采条件下地表沉陷预计及条带开采设计优化提供一定科学依据,特在原工程计算模型的基础上,保持边界条件、初始条件、岩层参数、开采厚度(4 m)等不变,变动开采深度,建立了采深分别为 500,700,900,1 100,1 300 m 的数值模型;固定开采深度 900 m,变动开采厚度,建立了采高分别为 2,4,6,8,10 m 的数值模型.

2 计算结果及分析

通过对不同采深、不同采高的 10 种数值计算方案进行大采宽条带分部开采的模拟计算,分析采深、采高与地表移动变形及下沉系数之间的关系.提取各方案模拟结果的最大下沉值、最大水平位移值,并计算出相应的下沉系数如表 2 和表 3;图 3~图 5 为采高 4 m,采深 700 m 时计算模型的地表沉陷三维图和地表下沉、水平移动等值线图;不同采深、不同采高对应的地表下沉、X 方向水平移动曲线如图 6~图 9 所示.

表 2 不同采深数值计算结果

采深/m	最大下沉/m	最大水平移动/m	下沉系数 q
500	1.030 0	0.301 1	0.257 5
700	0.823 2	0.205 3	0.205 8
900	0.632 5	0.143 7	0.158 1
1100	0.440 8	0.110 3	0.110 2
1300	0.260 4	0.080 3	0.065 1

表 3 不同采高数值计算结果

采高/m	最大下沉/m	最大水平移动/m	下沉系数 q
2	0.619 7	0.140 4	0.309 9
4	0.632 8	0.153 8	0.158 2
6	0.635 2	0.159 2	0.105 9
8	0.642 6	0.165 1	0.080 3
10	0.649 9	0.173 0	0.065 0

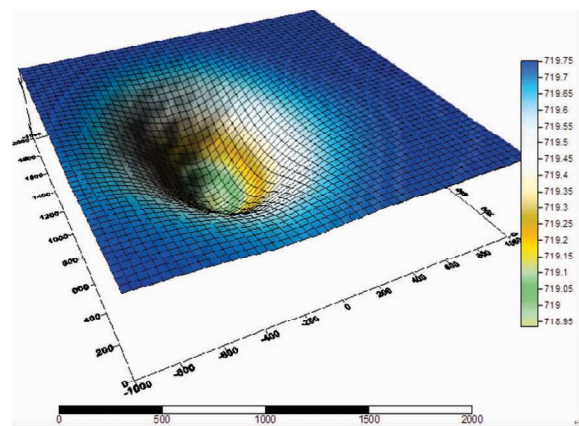


图 3 地表沉陷三维视图

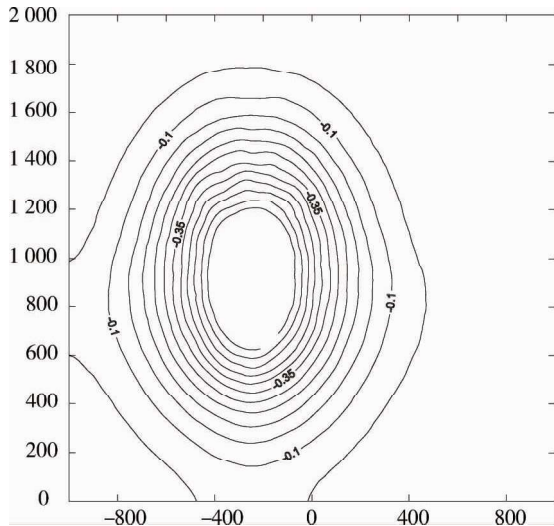


图4 地表下沉等值线

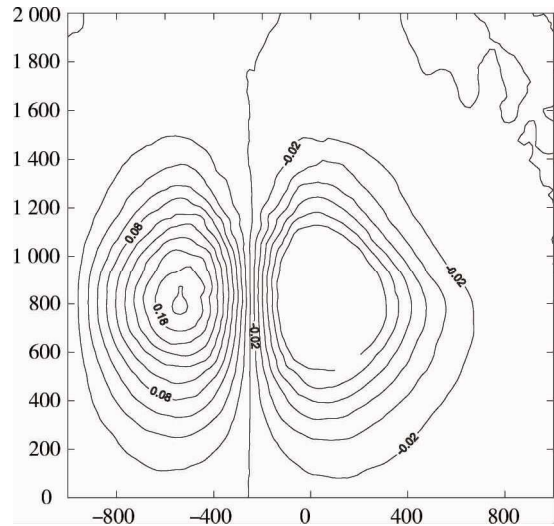


图5 地表x方向水平移动等值线

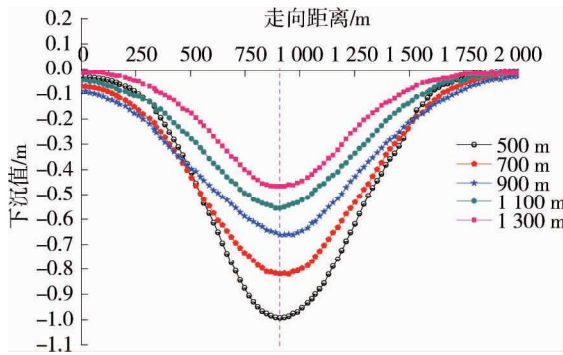


图6 不同采深地表下沉曲线

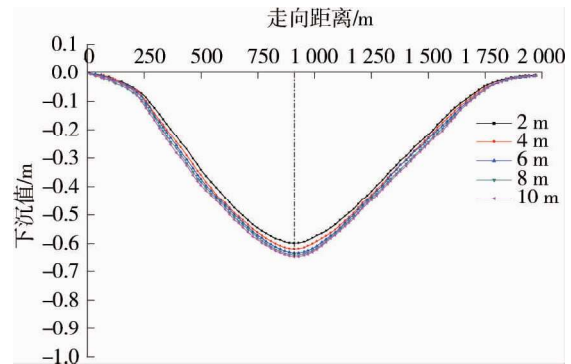


图7 不同采高地表下沉曲线

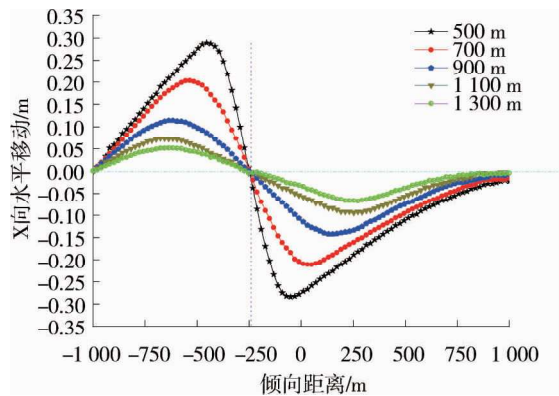


图8 不同采深地表水平移动曲线

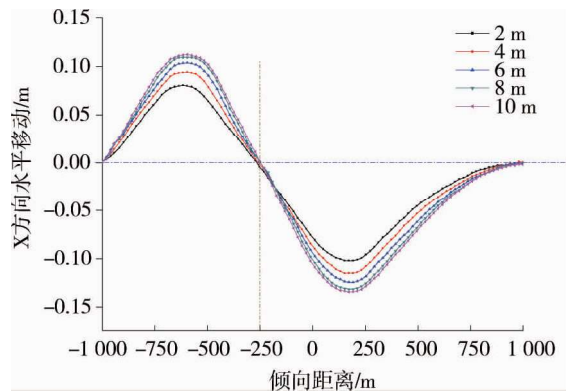


图9 不同采高地表水平移动曲线

1)从图3可以看出采深700 m采高4 m时地表的三维沉陷情况,结合表2和图4可知,沉陷盆地位于条带1上方,盆地中心与条带1中线(倾向方向)重合,最大下沉值达0.823 2 m.由图6可见,随着开采深度的增加(500→1 300 m),地表下沉值逐渐减小,并且减小的幅度趋于缓慢,最大下沉值不是位于条带的中线(走向),而是偏向于左侧煤柱约900 m的位置,说明进入深部开采后,由于控制地表沉降的坚硬岩层增多,煤层开采引起的覆岩移动变形量减小,变形难以传播至地表或波及地表后,变形已大幅度较弱.文献[9]也指出,关键层的数目对深部开采地表沉陷起着主要影响作用.同时,图中边界线上(0,2 000 m)的下沉值仍不为零(0.0~0.1 m),表明地表移动变形的影响已超出模型2 000 m×2 000 m范围.从图7可以看出,随着开采厚度的增加(采深固定为900 m),地表下沉值呈增大的趋势,但增幅不大,说明深部开采条件下采高的增加对地表下沉影响并不明显,因此,在满足地表允许变形值的情况下,可适当加大开采厚度.

类似图 6,地表最大下沉靠近左侧煤柱,并不位于条带走向中点.

2)从图 8 可以看出,随着采深的增加,地表水平移动值逐渐减小,减小的幅度由大渐小,曲线中性点位于条带倾向的中线上,而沉陷盆地水平移动的正负拐点分别偏向两侧的煤柱,且随采深的加大,偏移的距离有所增大,表明地表变形范围有向外扩展的趋势.由图 9 可知,随着开采厚度的增加(采深为 900 m),地表水平移动值呈增大的趋势,但增大幅度较小,采高 10 m 时最大水平移动值为 0.17 m,与浅部开采相比,采高对水平移动的影响显著减弱.沉陷盆地 X 轴正负向的最大水平移动值分别偏向两侧的煤柱.

3)对表 2 和表 3 中采深、采高与地表最大变形、下沉系数的结果数据进行回归分析可知,地表最大变形与采深、采高及下沉系数与采深之间近似呈线性关系(如图 10~图 12),回归分析式可表示为

$$Y = a + bX. \tag{1}$$

式中:Y 为地表最大下沉值(或地表最大水平移动值、下沉系数),m;X 为开采深度(或开采厚度),m;a,b 为方程回归系数.

下沉系数与采高之间呈现非线性的衰减关系,其回归分析式采用幂函数可较好的拟合,表达式为

$$Q = aM^b. \tag{2}$$

式中:Q 为下沉系数;M 为开采厚度,m;a,b 为方程回归系数.各回归方程式中的拟合参数如表 4 所示.

4)从图 10 和图 11 可以看出,地表最大变形随着的采深的增加线性减少,而随着采高的增大线性增加,但上升十分平缓,表明深部宽条带开采条件下,采深对地表变形的影响较采高大.由图 12 可知,地表下沉系数随着采深和采高增加均下降,与采深呈线性递减的关系,且下降的幅度较大;而与采高则呈非线性衰减的关系,并逐步趋于稳定,如图 13 所示.其关系表达式为

$$Q = 0.6085M^{-0.9734}. \tag{3}$$

式中:M 为开采厚度.图 11 及式(3)表明,大采高条件下采高对下沉的影响变化比较小,为充分解放建筑物下的压煤量,实现深部大采宽条带开采的高产高效,可根据实际情况适宜提高一定的开采厚度^[10,11].

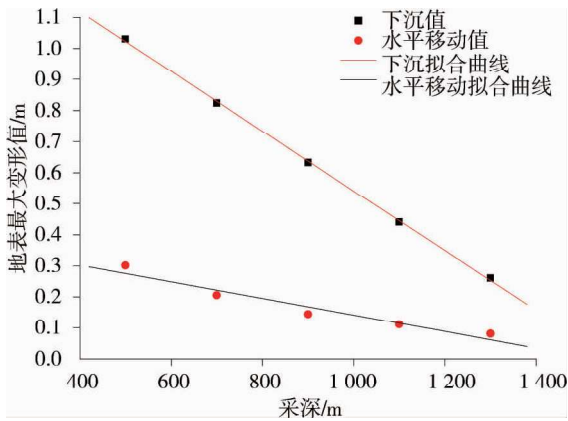


图 10 最大地表变形与采深的关系曲线

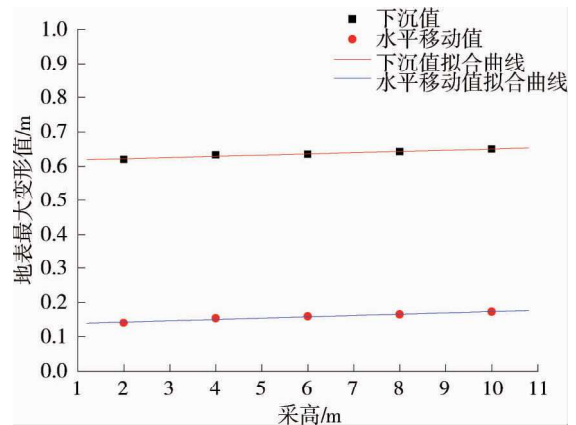


图 11 最大地表变形与采高的关系曲线

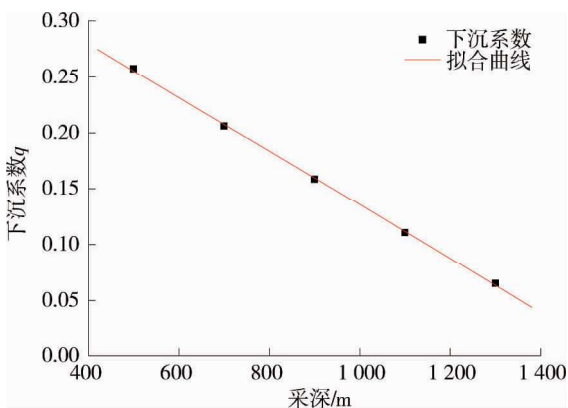


图 12 地表下沉系数与采深的关系曲线

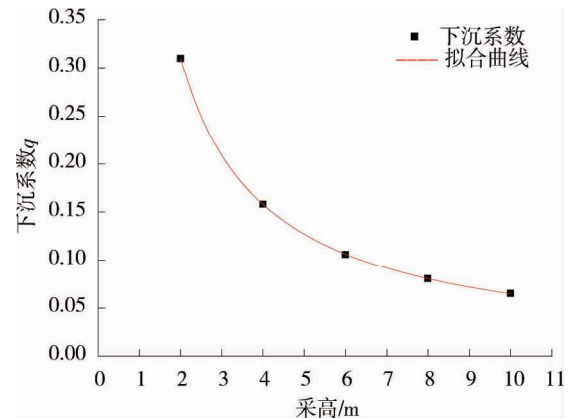


图 13 地表下沉系数与采高的关系曲线

表4 拟合参数

函数关系	<i>R</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
采深 vs 下沉	-0.999	1.502	-9.608E-4
采深 vs 水平移动	-0.968	0.410	-2.683E-4
采深 vs 下沉系数	-0.999	0.376	-2.402E-4
采高 vs 下沉	0.979	0.615	0.003 5
采高 vs 水平移动	0.985	0.135	0.003 8
采高 vs 下沉系数	0.999	0.609	-0.973 0

3 结论

1) 深部大采宽开采条件下,随着开采深度的增加,由于控制地表沉降的坚硬岩层数目增多,地表下沉值和地表水平移动值逐渐减小,且减小的幅度由大渐小,而地表移动变形的影响范围超出模型边界,较浅部开采的地表移动边界大.沉陷盆地水平移动的正负拐点分别偏向两侧的煤柱,且随采深的加大,偏移的距离有所增大,表明地表变形范围有向外扩展的趋势.

2) 随着开采厚度的增加,地表下沉值和地表水平移动值呈增大的趋势,但增大幅度较小,与浅部开采相比,采高对水平移动的影响显著减弱.在满足地表允许变形值的情况下,可适当加大开采厚度.

3) 地表最大变形随着采深的增加线性减少,而随着采高的增大线性增加,地表下沉系数与采深呈线性递减的关系,而与采高则呈非线性衰减的关系,其关系表达式可表示为 $Q=0.608 5M^{-0.973 4}$,因此,进入深部采用大采宽进行建(构)筑物下条带开采时,可据实际适当增大一定的开采厚度,充分解放建筑物下的压煤量,提高煤矿企业的效益.

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2804-2813.
- [2] 周宏伟,谢和平,左建平.深部高地应力下岩石力学行为研究进展[J].力学进展,2005,35(1):91-98.
- [3] 李凤明,耿德庸.我国村庄下采煤的研究现状、存在问题及发展趋势[J].煤炭科学技术,1999,27(1):10-13.
- [4] 杨伦,温吉洋,于世全.极不充分采动条件下地表下沉规律及计算方法研究[J].中国地质灾害与防治学报,2005,16(1):81-83.
- [5] 朱刘娟,邹友峰,郭增长,等.深部开采地表沉陷预测与控制存在的问题及对策探讨[J].中国矿业,2007,16(12):61-64.
- [6] 高保彬,李德海,王东攀.FLAC^{3D}在深部宽条带开采沉陷预计中的应用[J].能源技术与管理,2005(5):1-3.
- [7] 刘贵,张华兴,徐乃忠.深部厚煤层条带开采地表沉陷规律模拟研究[J].矿山测量,2008(1):53-56.
- [8] 郭文兵,刘义新.深部条带开采下沉系数与采厚关系的数值模拟[J].河南理工大学学报(自然科学版),2007,26(3):254-258.
- [9] 许家林,连国明,朱卫兵.深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响[J].煤炭学报,2007,32(7):687-690.
- [10] 于保华,朱卫兵,许家林.深部开采地表沉陷特征的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):422-427.
- [11] 彭林军,赵晓东,李术才.深部开采地表沉陷规律模拟研究[J].上岩土力学,2011,32(6):1911-1914.