

工作面推进过程中上覆岩层冒落的数值模拟

梁赛江

(山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:为了研究在工作面推进过程中上覆岩层冒落情况,基于“支架梁”模型理论、连续介质力学和损伤介质力学原理,采用RFPA^{2D}分析系统,模拟了岩石从裂纹萌生、扩展直至断裂的全过程,再现了煤层采动中其上覆岩层来压及工作面推进过程中剪应力、岩层下沉的变化规律。结果表明:厚顶对上覆岩层的运动起控制作用,它是该岩层系统中的关键层,另外,随着工作面向前推进,在工作面前方煤壁形成支承压应力升高区,上覆各岩层的下沉量不断增加。

关键词:上覆岩层;数值模拟;应力;下沉量

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0015-05

Numerical Simulation of Overlying Strata Caving in the Process of Face Advancing

LIANG Saijiang

(College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to study the caving situation of overlying strata in the process of face advancing, and based on the theory of “support beam” model and the principles of continuous media mechanics and damage media mechanics, the author simulated the whole process from crack being germinated and expanded to roof rocks being fractured by using RFPA^{2D} analysis system, reproducing the weighting of overlying strata in coal mining and changing laws of shear stress and strata subsidence in the process of face advancing. The results showed that the thick roof rock controlled the movement of overlying strata and it was critical layer in rock system. In addition, with the face advanced forward, the area of abutment pressure increased was formed at the coal wall of working face and the subsidence of overlying strata continuously increased.

Key words: strata; numerical simulation; stress; convergence

煤层开采后,上覆煤岩体在自重作用下,将产生变形与破断,导致覆岩内采动裂隙发育和扩展^[1-4],最终在上覆岩层中由下至上形成竖向“三带”。为了了解在煤矿开采过程中上覆岩层冒落的规律,有必要对开采过程中覆岩采动裂隙场动态分布特征进行研究。目前的现场试验或者理论计算,很难准确掌握覆岩应力、移动变形和裂隙发育状况,通过数值模拟可以发现采场覆岩应力、移动和裂隙发育等现场难以观测到的规律。

对于采动煤岩体裂隙与离层发育规律,国内外学者从理论、实验和数值模拟上获得了大量的成果,主要有:赵德深^[5]提出了采动覆岩“拱梁平衡理论”;任强等^[6]对覆岩采动裂隙带发育规律进行了数值模拟分析;王锦山^[7]采用相似试验方法研究了孤岛工作面上覆岩层的变形破坏规律;梁运培等^[8]基于关键层理论将岩层移动的关键层、岩层组合以及层间离层统一在组合岩梁模型的体系中,建立了关键层、岩层组合以及层间

收稿日期:2011-05-30

基金项目:教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0843)。

作者简介:梁赛江(1976—),男,浙江新昌人,讲师,博士,主要从事矿山压力及其岩层控制、特殊开采等方面的研究工作。

E-mail:ckwangang@163.com.

离层的统一判别准则,预测了采场上覆岩层垂向裂隙的平均宽度;彭永伟^[9]基于煤体采动裂隙的实测图像,通过基于 FLAG 的二次开发,实现了煤体采动裂隙场的动态演化和非均匀介质应力渗流耦合模拟。本研究利用 Realistic Failure Process Analysis^{2D}(RFPA^{2D})模拟系统建立了覆岩离层裂隙演化、变形试验模型,对采动煤岩体的裂隙动态演化与变形特征进行研究。

1 理论模型

为了简化研究问题,反应出在工作面推进过程中上覆岩层冒落的情况,对开挖部分采用“支架梁”理论进行分析研究。“支架梁”受力模型^[10],如图 1 所示。

系统变形能:

$$U_1 = 2 \times \frac{1}{2} k_1 \Delta l^2 = k_1 l^2 \left(1 - \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^2; \quad (1)$$

外力势能:

$$U_2 = -2 \times \int_{\theta_0}^{\theta} p dh = -2 \times \int_{\theta_0}^{\theta} p \left[-\frac{l \cos \theta_0}{2 \cos^2 \theta} \right] dh = \int_{\theta_0}^{\theta} p \frac{l \cos \theta_0}{\cos^2 \theta} dh; \quad (2)$$

系统总势能:

$$U = U_1 + U_2 = k_1 l^2 \left(1 - \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta} \right)^2 + \int_{\theta_0}^{\theta} p \frac{l \cos \theta_0}{\cos^2 \theta} dh. \quad (3)$$

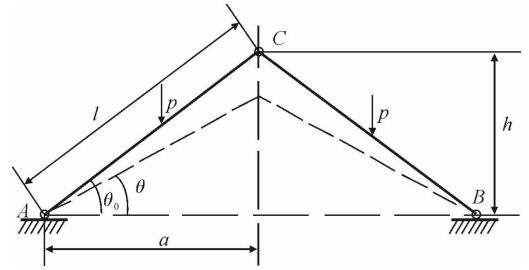


图 1 “支架梁”受力模型示意图
Fig. 1 The sketch of the bearing model of “support beam”

随着开采过程的进行,系统的弯曲下沉,则上覆岩层的位移量为:

$$\Delta \alpha = l [\cos(\theta - \alpha) - \cos \theta]. \quad (4)$$

其中: θ 为岩梁变形后与水平方向的夹角, α 为水平位移引起的岩梁 θ 角变化值。

2 RFPA^{2D}模拟分析

2.1 岩石破裂渐进过程分析系统

RFPA^{2D}是一个能模拟岩石从裂纹萌生、扩展直至断裂全过程的数值分析系统,该系统基于连续介质力学和损伤介质力学原理,具有应力分析和破坏分析两方面功能。其显著特点是将岩石类材料的不均匀性参数引入到计算单元,充分考虑了岩石介质的非均匀性。

2.2 力学模型

根据表 1 所示的岩层参数,基于 Volterra 级数的 RFPA 特征模型,建立平面应变力学模型,其受力情况及岩层分布情况如图 2 所示。回采煤层埋深为 251 m,厚度为 5 m,模型左、右两侧为水平方向位移约束,底部受铅垂方向位移约束。

表 1 岩层参数表

Tab. 1 The parameters of strata

岩层	厚度/m	关键层位	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	密度/(kg/m ³)
表土层	170	—	0.9	0.32	11.0	1 890
硬岩	20	亚关键层	36.0	0.22	33.6	2 410
软岩	36	—	25.0	0.25	19.0	2 370
厚顶	24	主关键层	33.0	0.33	36.0	2 260
煤层	5	—	10.0	0.39	16.0	1 460
底板	15	—	42.0	0.21	39.8	2 410

3 数值模拟结果及分析

3.1 模型的建立

用岩石破断过程分析软件 RFPA^{2D}对随工作面推进时上覆岩层冒落破坏情况进行数值模拟,整个模型按平面应变问题进行分析。RFPA^{2D}矿压模型在工作面推进方向取 600 m,铅垂方向取 270 m,基元取 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,总基元数为 $600 \times 270 = 162\ 000$ 个。工作面每步开挖 20 m,开挖 10 步,共开挖 200 m。岩层之间均设定了弱层。软件用基元弹性模量、单轴抗压强度等按 WEIBULL 随机分布,来模拟岩石材料的不均质性和各向异性,根据该矿岩层综合柱状图关于岩性的描述,岩层的均质系数取 2~8。取 2 表示很不均质,5 为一般,8 较为均质。RFPA^{2D}计算模型如图 3 所示。

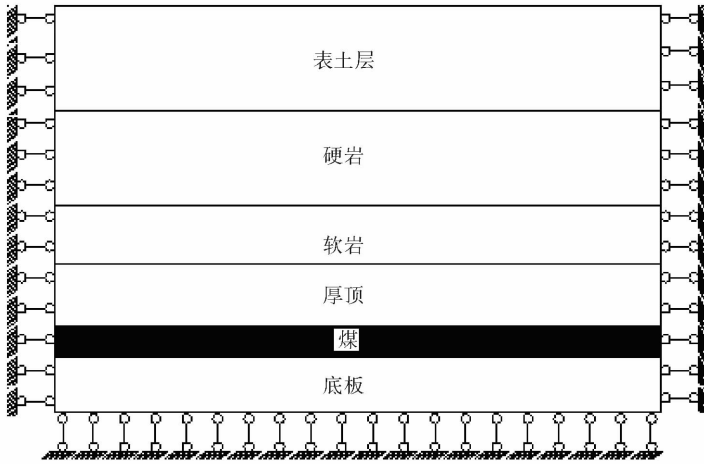


图 2 力学模型示意图

Fig. 2 Sketch of mechanical model

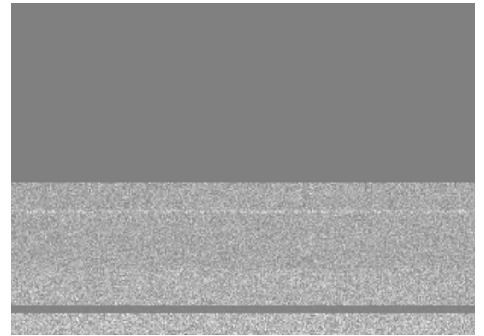


图 3 RFPA^{2D}矿压模型图

Fig. 3 The RFPA^{2D} model of rock pressure

3.2 模拟结果分析

3.2.1 上覆岩层变形、破坏、垮落效果图分析

通过数值模拟,得到在工作面推进过程中上覆岩层的变形、破坏、垮落效果图如图 4、图 5 所示。

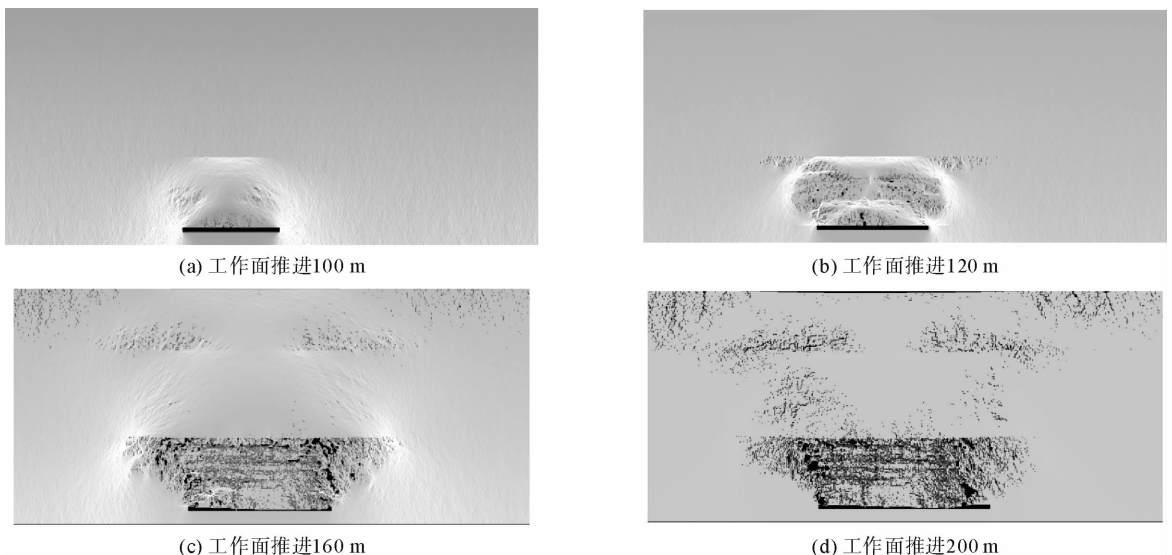


图 4 随工作面推进上覆岩层的应力变化图

Fig. 4 The change of stresses of overlying strata with the face advancing

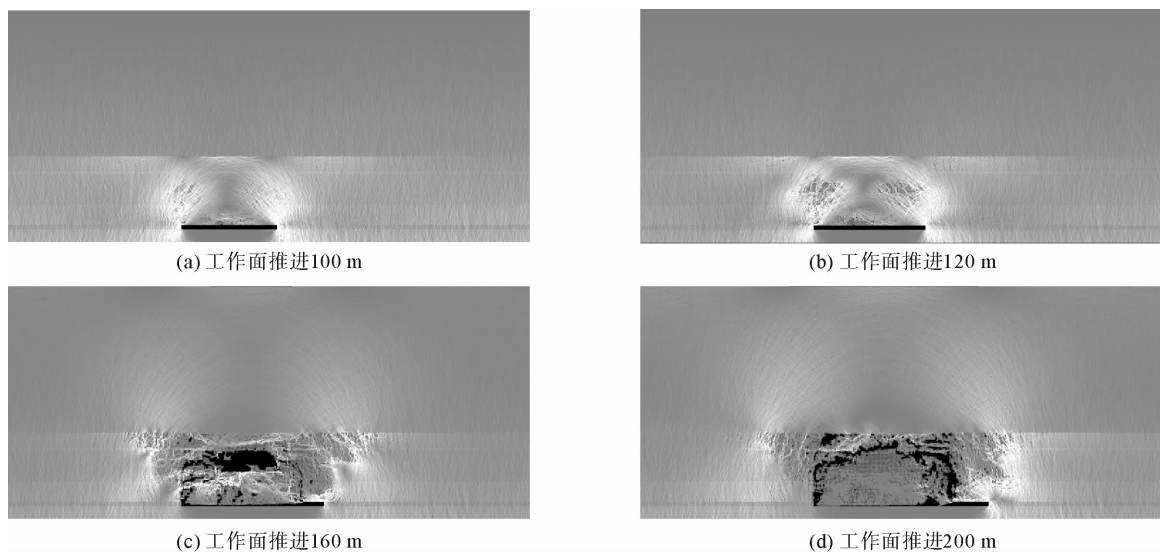


图5 随工作面推进上覆岩层的剪应力云图

Fig. 5 The cloud atlas of shear stresses of the overlying strata with face advancing

从图4和图5可以看出,工作面推进初期,上覆岩层几乎不受采动影响,但是随着工作面继续推进,厚顶逐渐出现裂纹、破坏,当工作面推进到160 m时发生垮落,上覆岩层最终也发生垮落,这表明厚顶对上覆岩层的运动起控制作用,它是该岩层系统中的关键层。当工作面分别推进到180 m和200 m时发生第一和第二周期来压。

随着工作面向前推进,原岩应力状态受到扰动,引起采空区围岩应力的重新分布,在开切眼和工作面煤壁处出现应力集中,工作面前方煤壁形成支承压应力升高区,上覆岩层应力从压应力转变为拉应力,形成拉应力升高区,岩层间应力也逐渐增大,说明岩层下沉变形增大,开切眼和工作面煤壁处的剪应力随采场的推进逐渐增大,围岩产生压剪破坏。剪应力出现在开切眼和工作面煤壁处,呈反对称分布。随着工作面向前推进,在开切眼和工作面煤壁处出现剪切破坏点,逐渐发展成为剪切破坏带,最终导致厚顶垮落。

3.2.2 上覆岩层随工作面推进的下沉量变形曲线分析

图6—图8所示,分别是工作面推进过程中上覆岩层三条水平测线(分别是厚顶中部、软岩中部、硬岩层中部)随工作面推进的下沉量变形曲线。可以看出:初采期间,各岩层的下沉量均很小;随着工作面的推进,上覆各岩层的下沉量不断增加,厚顶的下沉量最大,和软岩之间形成离层;当工作面推进到120 m,硬岩、软岩及厚顶有相近的下沉量。

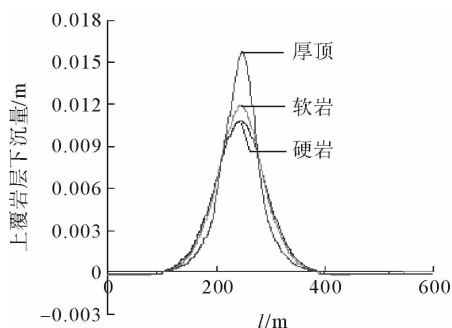


图6 工作面推进100 m上覆岩层的不同岩层下沉曲线图

Fig. 6 The subsidence curves of different rocks in overlying strata at the point of 100 m of face advanced

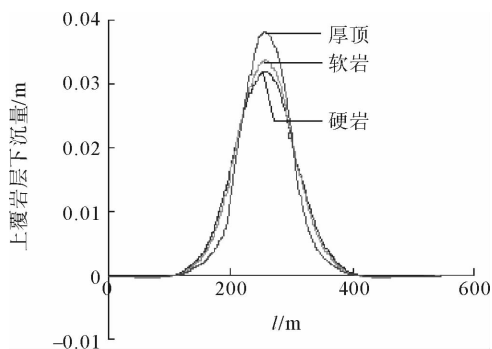


图7 工作面推进120 m上覆岩层的不同岩层下沉曲线图

Fig. 7 The subsidence curves of different rocks in overlying strata at the point of 120 m of face advanced

4 结论

1) 工作面初始推进阶段, 上覆岩层几乎不受影响, 但随着工作面向前推进, 厚顶逐渐破坏, 随着厚顶的垮落, 上覆岩层也发生垮落, 这表明厚顶对上覆岩层的运动起控制作用, 它是该岩层系统中的关键层。

2) 随着工作面的推进, 工作面前方煤壁形成支承压应力升高区, 采场上方靠近煤层的顶板中, 压应力转变为拉应力, 形成拉应力升高区, 导致顶板产生拉伸破坏, 工作面前后方剪应力呈中心对称分布, 在前后方煤壁上端形成压剪破坏。

3) 初采期间, 各岩层的下沉量均很小, 厚顶水平方向位移很小, 呈类似三角函数分布; 随着工作面的推进, 上覆各岩层的下沉量增加, 厚顶的下沉量最大, 和软岩之间形成离层, 厚顶的水平方向位移不断增加。

参考文献:

- [1] 扬帆. 急倾斜煤层采动覆岩移动模式及机理研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [2] 比尼斯基 Z T. 矿业工程岩层控制[M]. 孙恒虎, 译. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990.
- [3] GARCIA A B. Parameter optimization of influence function in mining subsidence[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, 34(7): 534-553.
- [4] COULTHARD M A, DIGHT P M. Numerical analysis of failed cemented fill at ZC/NBHC Mine[C]//Proceedings of 3rd Australia-New Zealand Geomechanics Conference. Wellington, 1980: 145-151.
- [5] 赵德深. 开采空间在覆岩中的传播规律[D]. 阜新: 阜新矿业学院, 1986.
- [6] 任强, 刘伟韬. 覆岩采动裂隙带发育规律的数值模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(7): 75-78.
REN Qiang, LIU Weitao. Numerical simulation analysis of overburden crack belt developing disciplinary[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(7): 75-78.
- [7] 王锦山. 孤岛工作面上覆岩层变形破坏规律相似试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(5): 6-11.
WANG Jinshan. Similar test research on the law of deformation and failure of overlying strata in an isolated island face[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(5): 6-11.
- [8] 梁运培, 孙东玲. 岩层移动的组合岩梁理论及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 654-657.
LIANG Yunpei, SUN Dongling. Study on the composed rock beam theory of strata movement and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 654-657.
- [9] 彭永伟. 高强度开采煤体采动裂隙场演化及其与瓦斯流动场耦合作用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
- [10] 侯公羽, 李先炜, 陶龙光. 断裂顶板锚拉支架支护系统的分叉行为[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 547-552.
HOU Gongyu, LI Xianwei, TAO Longguang. Bifurcation behavior of the fractured roof and truss support system[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(6): 547-552.

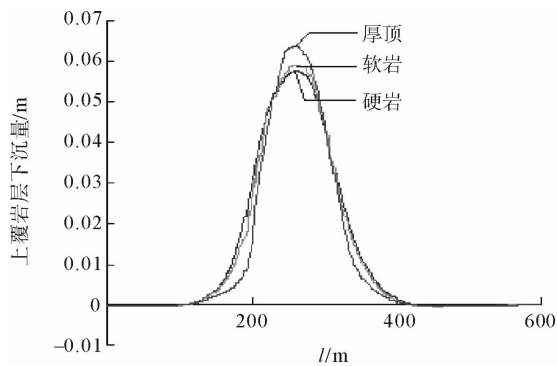


图 8 工作面推进 160 m 上覆岩层的不同岩层下沉曲线图
Fig. 8 The subsidence curves of different rocks in overlying strata at the point of 160 m of face advanced