

不同采高上保护层开采卸压效应的 UDEEC 数值模拟研究

潘红宇, 索亮, 李树刚, 林海飞, 李志梁

(西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:利用 UDEEC 软件对不同采高上保护层开采卸压效应进行了数值模拟,得到了在不同采高的上保护层开采时,被保护层在开采过程中的应力和位移变化规律,结果表明:上保护层开采后,采空区下部的被保护层垂直应力随着采高的增加而减小,垂直位移随着采高的增加而升高.为预防煤与瓦斯突出,优化卸压瓦斯抽采系统,提高卸压瓦斯抽采浓度、抽采量以及抽采率提供了一定理论依据.

关键词:不同采高;上保护层开采;数值模拟;卸压

中图分类号:TD803 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9102(2013)03-0006-06

目前,保护层开采是防治煤与瓦斯突出最经济、最有效的措施^[1-3].国内外学者普遍认为^[4-7],保护层开采后,下伏煤岩破裂、上鼓,使得煤岩体的裂隙伸张,地应力得到有效释放,煤层透气性系数成百甚至上千倍地增加,产生“卸压增透增流”效应,解吸的瓦斯通过裂隙泄入保护层工作面,从而达到消除被保护层瓦斯突出危险的目的.但目前就采高对保护层开采卸压效应影响的研究还较少,特别是在不同采高时,保护层的卸压率,卸压角和保护范围的对比关系分析,都有待进一步研究.而针对保护层卸压效应的研究,可以为煤层瓦斯抽采及保护效果的确提供重要的理论基础^[8-9].本文采用数值模拟试验的方法,就不同采高时上保护层开采对保护层卸压效应的影响规律进行了研究.

1 煤岩体变形与瓦斯渗流的耦合数学模型

1.1 瓦斯渗流场方程

煤层瓦斯的运动符合线性渗流规律,将瓦斯气

体简化为理想气体,渗流按等温过程处理,由气体状态方程和质量守恒定律,可得出瓦斯在煤岩体中流动的渗流场方程^[5]是

$$\alpha_p \nabla^2 (\lambda_i P) = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

式中: P 为瓦斯压力; λ_i 为透气性系数; α_p 为贮气系数.

1.2 煤岩体变形方程

对于煤岩体,用位移表达的应力平衡方程^[10]为

$$(\lambda + \mu) u_{j,ji} + \mu u_{i,ji} + F_i + (\alpha p)_{,i} = 0 \quad (2)$$

式中: λ, μ 为弹性力学的拉梅常数; μ_i 为*i*方向的位移; F_i 为*i*方向的体积力.

1.3 裂缝的变形方程

对于裂缝,其变形服从 Goodman 节理模型,即

$$\sigma'_n = k_n \varepsilon_n, \sigma'_{s_1} = k_s \varepsilon_{s_1}, \sigma'_{s_2} = k_s \varepsilon_{s_2} \quad (3)$$

式中: $\sigma'_n = \sigma_n - \beta_{pf}$; k_n, k_{s_i} 分别为裂缝法向与切向刚度; σ_n, σ_{s_i} 分别为裂缝法向应力与切向应力; $\varepsilon_n, \varepsilon_{s_i}$ 分别为法向应变与切向应变.

方程(1),方程(2),方程(3)即构成了煤岩体

收稿日期:2013-05-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51204134,51104118,51174157);陕西省教育厅科研计划资助项目(11JK0774);陕西省教育厅科学研究项目(2013JK0865,2013JK0876)

通信作者:潘红宇(1979-),男,湖南常德人,博士,讲师,主要从事煤矿瓦斯灾害防治研究. E-mail:panhy@xust.edu.cn

2 UDEC 数值模型的建立

2.1 模型的基本参数

正确的建立数值模型,离不开与实际相符的模型参数,但影响实际开采条件的因素很多,而数值模

型是在尽可能多的考虑这些因素的前提下,由实际简化而来,但同时又符合现场实际.模型的建立,必须要很好地反映材料的物理力学特性,如材料的均匀性,弱面影响以及非线性等因素.本模拟以某矿戊9-20180工作面为原型,模型的岩性参数如表1,表2所示.

表1 模型的煤岩层力学参数

Tab.1 Coal rock mechanics parameter of model

岩石性质	密度 $d/(g \cdot cm^{-3})$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	内摩擦角 $f/(^{\circ})$	内聚力 C/MPa	抗拉强度 σ/MPa
中砂岩	2 500	20.0	16.0	30.0	4.0	1.5
砂质泥岩	2 460	7.5	4.5	30.0	2.5	1.3
煤层	1 400	5.0	3.5	28.0	2.2	1.0
泥岩	2 500	12.0	9.0	32.0	0.8	1.2

表2 模型的煤岩层节理面力学参数

Tab.2 Mechanics parameter of coal rock joints surface of model

岩石性质	法向刚度 k_n/GPa	切向刚度 k_s/GPa	粘结力 C/MPa	摩擦角 $f/(^{\circ})$	抗拉强度 σ/MPa
中砂岩	7.8	2.8	0.2	4	0
砂质泥岩	4.2	2.0	0.1	2	0
煤层	2.6	1.3	0.2	8	0
泥岩	4.0	2.0	0.2	3	0

2.2 模型的边界条件

模型的边界范围如图1所示,模型高100 m,长200 m,模拟采深600 m,模型比例为1:100.考虑到模型边界效应的影响,模型的始采线位置距模型左边界28 m,终采线距模型右边28 m,上保护层开采方向从左到右,开采长度为144 m.根据计算模型的实际赋存条件,模型上部边界条件与上覆岩层的重力有关.为了研究方便,可将上部载荷的分布形式简化为均布载荷,上部边界条件为应力边界条件.模型的下部边界条件为底板,简化为位移边界条件,在 x 方向上可以运动, y 方向上为固定铰支座,即 $v = 0$.模型的两侧边界条件均为实体煤岩体,简化为位移边界条件,在 y 方向上可以运动, x 方向为上固定铰支座,即 $u = 0$.即模型的左右、底边界采用单向滚动控制,使边界岩体不至于影响内部岩体的应力迭代计算.

2.3 模型开采方法

上保护层开采后,下伏(煤)岩移动、变形、破坏是一个渐进的演变过程,是伴随着工作面向前推进,采空区范围不断扩大,应力不断调整变化的过程.为了掌握其发生和发展演化规律,对开采过程进行数值模拟,使之转化成为实际的动态问题.为此,针对不同采高的上保护层开采,建立3个数值模型,其保

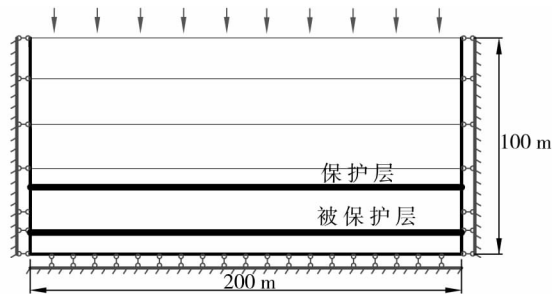


图1 上保护层开采数值模拟力学模型

Fig.1 Mechanical model of numerical simulation for protective layer mining

护层的采高分别为2 m,3 m,4 m.

3 数值模拟结果分析

为了分析上保护层开采过程中被保护层的卸压效应,就需要在模拟开采过程中提取出被保护层相关的应力应变数据.为此,在被保护层顶板保护层距切眼平距-20 m,-12 m,-4 m,4 m,12 m,20 m,28 m,36 m,44 m,52 m,60 m,68 m,76 m,84 m,92 m,100 m,108 m,116 m,124 m,132 m,140 m,148 m,156 m,164 m处布置垂直应力和垂直位移各24个检测点,用以监测不同采高的上保护层开采过程中,被保护层垂直应力和垂直位移的变化规律.

3.1 垂直应力变化规律

当上保护层开采后,其被保护层的卸压率和卸压角可分别由式(4)和(5)表示,

$$\eta_s = \frac{\sigma'_y}{\sigma_y} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan \frac{L_y}{S_x} \quad (5)$$

式中: η_s 为卸压率, σ'_y 为卸压后的垂直应力, σ_y 为原始垂直应力, θ 为卸压角, S_x 为被保护层卸压分界点与切眼的平距, L_y 为保护层与被保护层的间距。

1)从图2可以看出,当上保护层工作面开采结束后,岩层运动趋于稳定,位于模型两端保护煤柱下方的被保护层,其垂直应力较原始垂直应力相比原始垂直应力均有所升高.这是由于上保护层在开采以后,下伏煤岩的应力都转移集中到了模型两端保护煤柱的下方.而随着保护层采高的增加,煤柱所承担的上覆岩层的重力越大,其下部保护层的垂直应力变化也就越大,所以模拟中保护层采高由2 m,3 m到4 m时,从图2中可以看出模型两端保护煤柱下方被保护层垂直应力的变化随着采高的增大而增大,2 m采高时最高为原始垂直应力的1.2倍,3 m时为1.3倍,4 m时为1.5倍,均高于原始垂直应力。

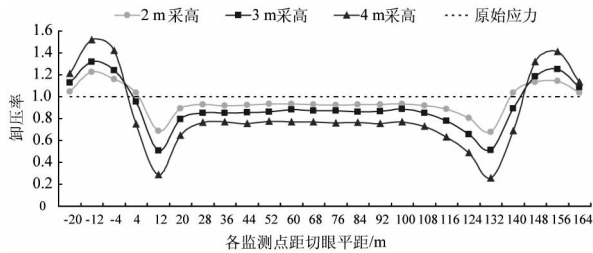


图2 不同采高上保护层开采144 m时被保护层的卸压率变化

Fig. 2 pressure relief rate changes of protected layer when protective layer mined 144 m in different mining height

2)当上保护层的开采活动结束后,位于采空区下部的被保护层垂直应力较原始垂直应力普遍降低.这是由于上保护层开采过后,采空区下伏煤岩由于卸压作用,产生膨胀变形,应力得到释放.而随着保护层采高的增加,采空区下伏煤岩膨胀变形增大,应力释放加大,卸压效果增强.所以模拟中保护层采高由2 m,3 m到4 m时,从图2中可以看出位于采空区下部的被保护层垂直应力的变化随着保护层采高的增大而相对增加,2 m采高时卸压率为0.91,卸

压角约为64°,3 m时卸压率为0.86,卸压角约为69°,4 m时卸压率为0.77,卸压角约72°。

3)从图2可以看出,当上保护层开采活动结束后,被保护层的垂直应力沿水平方向呈倒马鞍形分布.模型两端煤柱下方的被保护层垂直应力均高于原始垂直应力,采空区下方被保护层的垂直应力小于原始垂直应力,并且其应力变化随着保护层采高的增大而相对增加,从而进一步说明了保护层采高越大,被保护层卸压效果越明显。

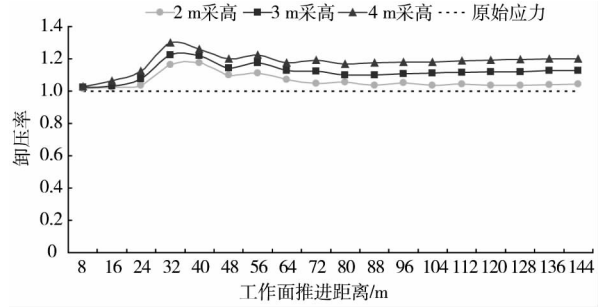


图3 不同采高下2#监测点随工作面推进的卸压率变化
Fig. 3 Pressure relief rate changes of 2# monitoring point under the different mining height

4)2#监测点位于模型左侧,开采层煤柱下方,与切眼平距为-20 m.从图3中可以看出,2#监测点的垂直应力随着工作面的推进,是一个先升高,在达到峰值后再降低,再逐渐趋于稳定的过程,稳定后的垂直应力大于原始应力.这是因为2#监测点位于开采层煤柱下方,当开采层形成切眼后,并随着工作面的推进,被保护层垂直应力重新分布,在2#监测点处于卸压后的应力集中区,故其垂直应力不断增大,当工作面推进到32 m左右时,老顶初次来压,垂直应力急剧上升,随着工作面的推进,又逐渐降低,之后随着工作面的周期来压,垂直应力有小幅上升,之后又逐渐降低,最后趋于稳定,但始终大于原始应力。

5)图3中3条曲线分别是保护层采高为2 m,3 m和4 m时,2#监测点随工作面推进垂直应力分布曲线,其中4 m采高时应力上升最快,达到的峰值最高,稳定后的垂直应力也最高,3 m采高时应力上升速度、峰值和稳定后的垂直应力居中,2 m采高时应力上升最慢,峰值最低,稳定后的垂直应力也最低.这是因为保护层采高越大,煤柱所承担的上覆岩层的重力越大,其下部保护层的垂直应力变化也就越大,所以位于应力集中区的2#监测点,在稳定后4 m采高时垂直应力增加的最大,在2 m采高时增加的最小,但都大于原始垂直应力。

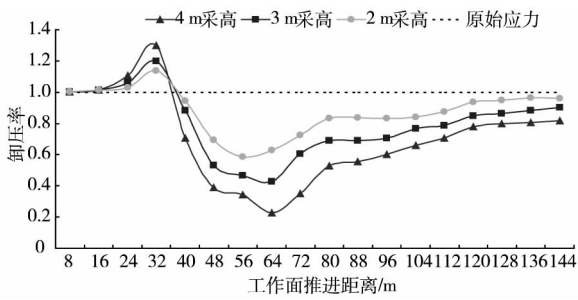


图4 不同采高下9[#]监测点随工作面推进的卸压率变化
Fig.4 Pressure relief rate changes of 9[#] monitoring point under the different mining height

6) 9[#]监测点位于模型中部,开采层采空区下方,与切眼平距36 m.从图4中可以看出,9[#]监测点的垂直应力随着工作面的推进,是一个先升高,在达到峰值后再急剧降低,再升高,再逐渐稳定的过程,稳定后的垂直应力小于原始应力.这是因为9[#]监测点与切眼平距36 m,当开采层切眼形成时,并随着工作面的推进,被保护层垂直应力重新分布,在工作面还未推过9[#]监测点上部时,其一直位于应力集中区,垂直应力表现为持续增加.随着工作面推过9[#]监测点上部,形成采空区时,9[#]监测点位于应力卸压区,垂直应力表现为迅速下降.而后随着工作面的继续推进,周期来压的出现,垂直应力在小幅升高后逐渐稳定,但始终小于原始应力.

7) 图4中3条曲线分别为2 m,3 m和4 m采高时,9[#]监测点随工作面推进的垂直应力分布曲线,其中,4 m采高时的垂直应力上升最快,达到的峰值最高,在卸压后垂直应力降幅也最大,稳定后的垂直应力相对最小.3 m采高时曲线居中.2 m采高时的垂直应力上升最慢,达到的峰值也最低,在卸压后垂直应力降幅也最小,稳定后的垂直应力相对最大.这是因为保护层采高越大,被保护层卸压区的煤岩膨胀变形越大,应力释放越明显,垂直应力变化越大.

3.2 垂直位移变化规律

当上保护层开采后,其被保护层的变形膨胀率可由式(6)表示,

$$\eta_d = \frac{S'_y}{M} \quad (6)$$

式中: η_d 为变形膨胀率, S'_y 为被保护层在垂直位移上的变化量, M 为被保护层煤层厚度.

1)从图5可以看出,当保护层工作面开采结束后,岩层运动趋于稳定,位于模型两端保护煤柱下方的被保护层,其垂直位移下降.这是由于上保护层在开采以后,下伏煤岩的应力都转移集中到了模型两端保护煤柱的下方,煤体被压缩,造成垂直位移下

降.而随着保护层采高的增加,煤柱所承担的上覆岩层的重力越大,其下部保护层的垂直应力变化越大,使得煤体压缩变形也越大.所以模拟中保护层采高由2 m,3 m到4 m时,从图5中可以看出模型两端保护煤柱下方被保护层垂直位移的变化随着采高增大而增大,但较原始高度均有所下降.

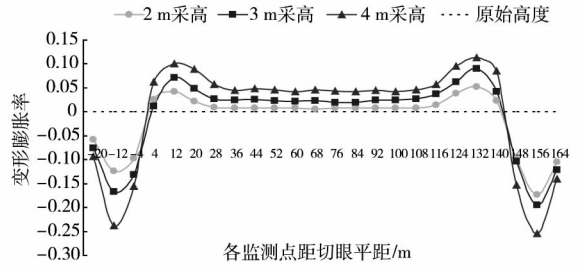


图5 不同采高上保护层开采144 m时被保护层变形膨胀率变化
Fig.5 Deformation of expansive rate changes of protected layer when protective layer mined 144 m in different mining height

2) 当上保护层的开采活动结束后,位于采空区下部的被保护层垂直位移较原始高度普遍上升.这是由于上保护层开采过后,采空区下伏煤岩由于卸压作用,产生膨胀变形,垂直位移均有所升高.而随着保护层采高的增加,被保护层煤体膨胀变形增大,所以模拟中保护层采高由2 m,3 m到4 m时,从图5中可以看出位于采空区下部的被保护层垂直位移的变化随着采高的增大而增大,其中,2 m采高时的变形膨胀率平均为0.81%,3 m采高时为1.72%,4 m采高时为4.86%,均高于原始高度.

3)从图5可以看出,当上保护层开采活动结束后,被保护层的垂直位移沿水平方向呈马鞍形分布.模型两端煤柱下方的被保护层垂直位移均低于原始高度,采空区下方被保护层的垂直位移均高于原始高度,并且其位移变化随着保护层采高增大而增大,从而进一步说明了保护层采高越大,被保护层卸压效果越明显.

4)从图6中我们可以直观的看出,卸压率为正值时(垂直应力相对原始应力增加),膨胀变形率为负值(垂直位移相对原始高度降低),且卸压率正值越大时,膨胀变形率负值越大,说明此区域处于应力集中区,煤体出现压缩变形.当卸压率为负值时(垂直应力相对原始应力减小),膨胀变形率为正值(垂直位移相对原始高度升高),且卸压率负值越大时,膨胀变形率正值越大,说明此区域处于应力减小区,煤体出现膨胀变形.从而进一步说明卸压率和变形膨胀率呈反比关系.

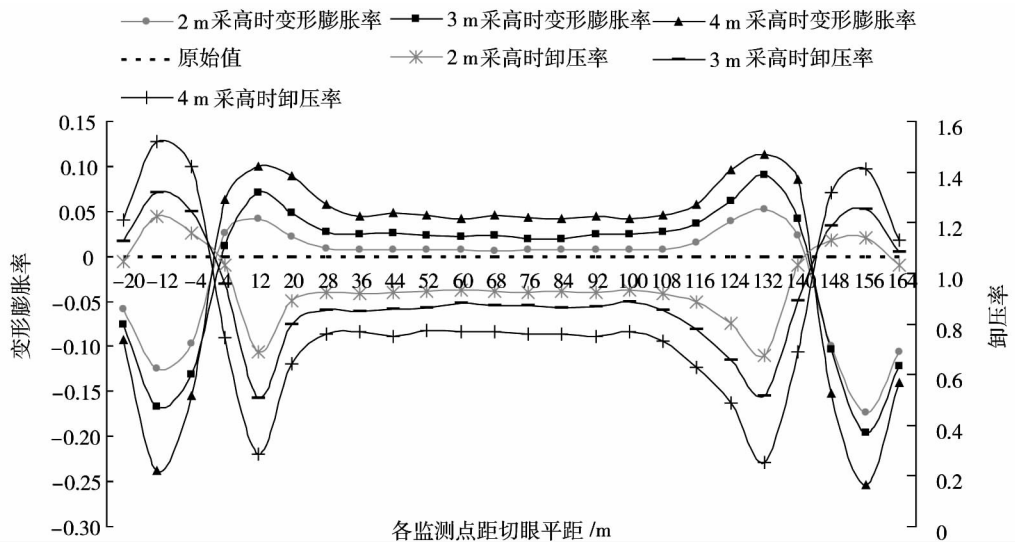


图6 不同采高上保护层开采后变形膨胀率与卸压率关系图

Fig. 6 The relation between deformation of expansive and pressure relief of protected layer after the protective layer mined in different mining height

4 结论

1) 上保护层开采后,当采高为 2 m, 3 m, 4 m 时,卸压率分别为 0.91, 0.86, 0.77, 卸压角分别为 72° , 69° , 64° , 说明了保护层采高越大, 被保护层卸压范围越大, 卸压效果越明显. 并且在上保护层开采活动结束后, 被保护层的卸压率沿水平方向呈倒马鞍形分布, 变形膨胀率沿水平方向呈马鞍形分布, 说明在上保护层开采后, 被保护层的卸压率和变形膨胀率呈反比关系.

2) 上保护层开采后, 引起了被保护层垂直应力的重新分布, 开采层保护煤柱下部的被保护层垂直应力经历了先升高, 再降低, 再逐渐稳定的过程, 稳定后垂直应力大于初始应力. 开采层采空区下部的被保护层垂直应力经历了先升高, 再大幅降低, 再升高, 再逐渐稳定的过程, 稳定后垂直应力小于原始应力. 这验证了被保护层垂直应力在水平方向上划分为 4 个特征区, 即: 原岩应力区、压缩区、膨胀区和应力恢复区.

3) 对上保护层开采卸压数值模拟结果分析可知, 根据被保护层垂直应力和位移变化, 能合理设计和布置瓦斯抽采钻孔, 提高卸压瓦斯抽采浓度和抽采量, 并进一步消除被保护层的突出危险性, 实现煤与瓦斯的安全共采.

参考文献:

- [1] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存及流动规律[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
Zhou S N, Lin B Q. The theory of gas flow and storage in coal seams [M]. Beijing: China Coal Industry Public House, 1998.
- [2] 于不凡. 开采解放层的认识与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
Yu B F. Understanding and practice of mining protective layer [M]. Beijing: China Coal Industry Public House, 1986.
- [3] 刘辉, 冯涛, 谢东海, 等. 煤层突出危险性预测的未确知测度方法研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, 23(4): 19-21.
Liu H, Feng T, Xie D H, et al. Risk prediction method for coal seams outburst based on uncertainty measurement theory [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(4): 19-21.
- [4] 张正林. 覆岩采动裂隙带瓦斯运移规律及其抽取与利用研究[D]. 西安: 西安科技学院, 2001.
Zhang Z L. Study on gas delivery law in mining fissure of overlying stratum and its drawing and utilizing [D]. Xi'an Institute of Technology, 2001.
- [5] 程远平, 俞启香. 中国煤矿区域性瓦斯治理技术的发展[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 383-386.
Cheng Y P, Yu Q X. Development of regional gas control technology for Chinese coalmines [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 383-386.
- [6] 张拥军, 于广明, 路世豹, 等. 近距离上保护层开采瓦斯运移规律数值分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1): 398-404.
Zhang Y J, Yu G M, Lu S B, et al. Numerical analysis of gas flow law with short distance upper protective layer gas extraction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(sup1): 398-404.

- [7] 程远平,俞启香,袁亮. 上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽采技术[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):483-486.
Cheng Y P, Yu Q X, Yuan L. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(4): 483-486.
- [8] 张少龙. 上保护层开采条件下瓦斯渗流规律实验研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
Zhang S L. Experimental study of gas seepage on the protective layer mining conditions [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [9] 宋振骥,李绍泉,李伟. 盘江矿区近距离多煤层下保护层开采可行性分析及技术实践[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011,26(1):5-7.
Song Z Q, Li S Q, Li W. Feasibility analysis and engineering practice of low exploitation of protective seam of coal seam group with near distance in Panjiang mining areas[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 26(1):5-7.
- [10] 赵阳升,胡耀青,赵宝虎,等. 块裂介质岩体变形与气体渗流的耦合数学模型及其应用[J]. 煤炭学报,2003,28(1):41-45.
Zhao Y S, Hu Y Q, Zhao B H, et al. Coupled mathematical model for solid deformation and gas seepage of rock matrix - fractured media and its applications[J]. Journal of China Coal Society, 2003,28(1):41-45.
- [9] 宋振骥,李绍泉,李伟. 盘江矿区近距离多煤层下保护层开采可行性分析及技术实践[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),

UDEEC numerical simulation study of pressure relief effects of protective layer mining in different mining height

PAN Hong - yu, SUO Liang, LI Shu - gang, LIN Hai - fei, LI Zhi - liang
(School of Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted by using UDEEC for the pressure relief effects of protective layer mining in different mining height. The variational law of stress and displacement were gotten. The results show that, after mined the upper protective layer, the vertical stress of protected layer under the gob decreases with increase of mining height, but the vertical displacement of protected layer under the coal pillar increases. This research provide some theoretical basis on the prevention of gas outburst, the drainage system of pressure relief gas is optimized, drainage concentration, volume and rate of pressure relief gas are improved.

Key words: different mining height; protective layer mining; numerical simulation; pressure relief