

# 浅埋煤层弱胶结顶板破断规律数值模拟研究

张洪彬, 田成林, 孙 焮, 宁建国

(山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**结合高家梁煤矿工作面开采条件及岩石力学性能,利用 UDEC 数值模拟软件,对自开切眼至充分采动全过程覆岩随工作面推进时的变形、冒落情况进行了数值模拟,得到浅埋煤层不同开采阶段上覆弱胶结顶板的破断及运动规律。研究表明:浅埋弱胶结顶板在初次来压期间经历直接顶垮落、形成“类基本顶”、基本顶断裂三个阶段。

**关键词:**浅埋煤层;弱胶结;顶板破断;数值模拟

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)02-0036-05

## Numerical Simulation of Roof Break Laws in Weakly Cemented Shallow Seam

Zhang Hongbin, Tian Chenglin, Sun Bi, Ning Jianguo

(College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** Based on the mining conditions of Gaojialiang Coal Mine and its rock mechanical performance, the deformation and caving of overlying strata during the whole process from open-off cut to fully mining were simulated with UDEC. Break and movement laws of weakly cemented roof in shallow seam at different mining stages were obtained. Studies show that the weakly-cemented roof in shallow seam experiences three stages during the initial pressure: collapsing of immediate roof, forming of similar basic roof, and breaking of basic roof.

**Key words:** shallow seam; weak cementation; roof break; numerical simulation

近年来,随着煤炭产量的大幅度提高,我国东部煤炭资源储量逐渐匮乏,煤炭开采的重心已由东部转移至西部。西部煤田多为厚煤层,构造简单,开采条件优越,在我国能源发展中具有重要战略意义<sup>[1]</sup>。但西部地区地质条件不同于东部地区,在煤炭开采中经常遇到强度低、胶结差、易风化、遇水泥化的岩层。

UDEC(Universal Distinct Element Code)数值模拟软件较其他离散元软件拥有更多的适用性和优点,能很好地模拟煤层开挖后顶板冒落、垮落、离层的过程,可以较准确地分析围岩性质、采动影响、支护特性等因素对巷道稳定性的影响。目前该软件开发得相当成熟,已经在岩土工程、采矿工程、地质工程领域得到广泛应用,被公认为对节理岩体进行数值模拟的一种行之有效的办法。本文结合高家梁煤矿浅埋煤层的实际地质条件,利用 UDEC 数值模拟软件,建立数值模拟模型,根据工作面的推进距离模拟煤层开挖后顶板冒落、垮落、离层的过程,分析浅埋弱胶结顶板的破断规律。

收稿日期:2014-03-24

基金项目:山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目;山东科技大学“矿山压力与岩层控制”创新团队基金项目(2010KYTD105);山东科技大学研究生创新基金项目(YC140301)

作者简介:张洪彬(1990—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的学习与研究。

E-mail:1059556817@qq.com

宁建国(1975—),男,山东宁阳人,副教授,博士,主要从事深部巷道围岩支护设计等研究,本文通信作者。

E-mail:njglxh@126.com

## 1 现场地质条件

高家梁煤矿位于鄂尔多斯市伊金霍洛旗纳林陶亥镇境内,主采煤层 2-2<sub>上</sub>。20107 工作面所在煤层为 2-2<sub>上</sub> 煤层,位于 201 盘区;矿井 2<sub>上</sub> 和 2<sub>中</sub> 煤层顶板多为弱胶结砂质泥岩,属弱胶结顶板,岩层总体特征为:结构松散,节理发育,强度低,易软化,岩石抗压及抗变形能力差。工作面走向长 196 m,倾向长 1 244.6 m,工作面煤层厚度 3.38 m,煤层倾角 2°~5°,综合机械化一次采全高,其覆岩参数见表 1,由表 1 可知 20107 工作面上覆岩层为典型的弱胶结岩层。

表 1 高家梁煤矿 20107 工作面上覆岩层物理力学参数

Tab.1 Overlying strata physical and mechanical parameters of 20107 working face of Gaojialiang Coal Mine

岩性	厚度/m	容重 $\gamma$ /(N/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ /GPa	粘聚力 $C$ /MPa	内摩擦角 $\varphi$ /(°)	泊松比 $\mu$	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa
风化砂岩	15.15	23 300	18.0	1.7	30	0.22	20.0
粉砂岩	5.30	23 800	40.0	7.4	38	0.20	48.3
粗粒砂岩	11.20	24 100	18.0	1.4	30	0.28	15.3
炭质泥岩	21.15	24 300	18.0	1.7	32	0.27	15.3
砂质泥岩	16.90	24 100	18.0	1.8	32	0.25	28.3
煤	3.38	13 000	13.5	1.2	38	0.25	14.8
泥岩	1.90	21 000	12.0	1.7	30	0.20	0.8
细砂岩	8.00	24 300	38.0	3.2	38	0.20	37.5

## 2 数值模型的建立

### 2.1 数值模拟模型

为了分析 20107 工作面开采期间覆岩的破断运动规律,需要有相当长的开采范围。由高家梁煤矿 20107 综采工作面弱胶结顶板上覆岩层所建模型如图 1 所示,模型长度 200 m 建模。垂直方向的模拟高度有 100 m,煤层厚度 3.38 m,模拟开采厚度为一次采全高。

### 2.2 模型的基本参数

以 20107 工作面实际地质和开采条件为依据,建立 20107 工作面开采覆岩破坏规律计算模型。模型块体的本构关系为莫尔-库仑模型,节理的本构模型选为面接触的库仑滑移模型,由块体和节理的本构关系确定数值计算所需要的属性参数,各岩层物理力学参数按表 1 选取,表中参数是结合实验室和相关参考资料分析得到,粘聚力、摩擦角和弹性模量按该岩体参数选取,体积模量和剪切模量由泊松比和弹性模量按公式(1)计算得出,根据各个力学参数设定,其覆岩的弱胶结性在模拟中也可以很好地实现。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}; G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1)$$

其中: $K$  为岩体体积模量; $G$  为岩体剪切模量; $E$  为岩体的弹性模量; $\mu$  为岩体的泊松比。

### 2.3 数值模型的建立

根据实际地质情况,本数值模拟模型的边界条件如下。

下部边界条件:本模型的下部边界条件为底板,简化为位移边界条件,在  $x$  方向可以运动, $y$  方向为固定铰支座,即  $v = 0$ 。



图 1 数值模拟模型示意图

Fig.1 Numerical simulation model schemes

两侧边界条件:本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  $y$  方向可以运动,  $x$  方向为固定铰支座,即  $u=0$ 。

模拟比例为 1:50,水平方向 150 m,垂直方向 90 m,煤层厚度 4 m,模拟开采厚度为一次采全高,网格需根据各岩层的物理力学特性及厚度进行划分,共分为 5 500 个单元,具体如图 2 所示。

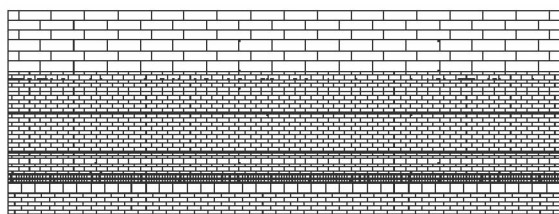


图 2 数值模拟模型块体划分

Fig. 2 Numerical simulation model of block division

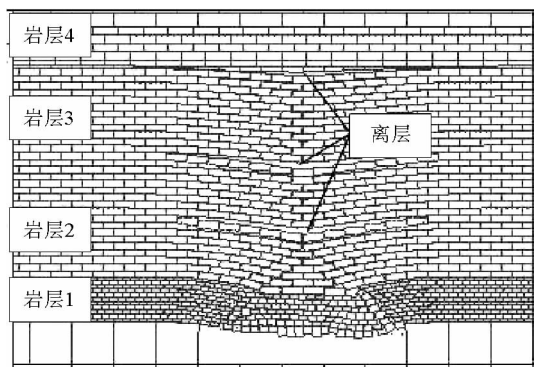
### 3 数值模拟结果分析

利用 UDEC 数值模拟软件对 20107 综采工作面浅埋顶板初次及周期来压阶段进行数值模拟,并分析各个阶段的运动特征。

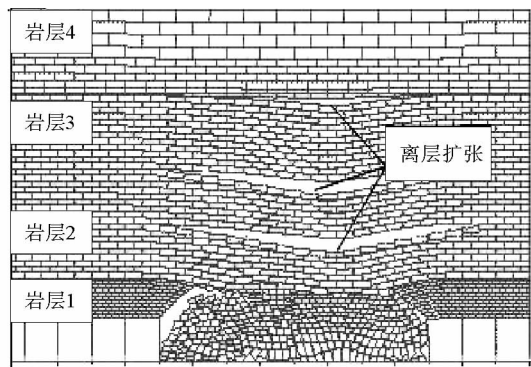
#### 3.1 浅埋弱胶结顶板初次来压阶段

1)如图 3(a)所示,当回采工作面从开切眼位置向前推进时,上覆岩层逐渐暴露,当工作面推进到 10 m 时,由于重力作用弱胶结顶板岩层 1 部分垮落,并与上方岩层 2 之间出现小范围离层。

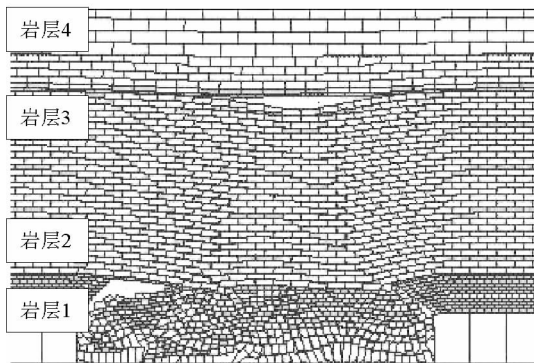
2)如图 3(b)所示,当工作面推进至 20 m 时,采空区中段岩层顶板垮落,岩层 2 与岩层 3 之间的离层继续扩张发育,并随工作面的推进,岩层 2 的悬跨度逐渐增大,岩层 3 和岩层 4 之间的层面离层也在慢慢发展并向两嵌固端延展,即离层有向上和两端发展的趋势。



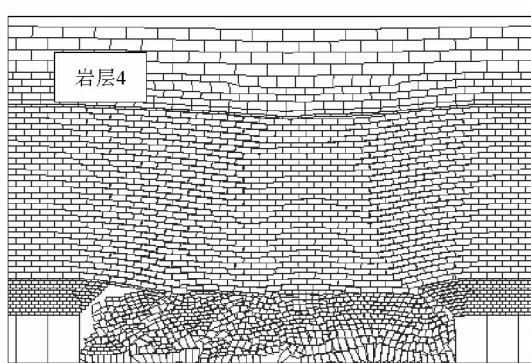
(a) 推进 10 m  
(a) Promoting 10 m



(b) 推进 20 m  
(b) Promoting 20 m



(c) 推进 30 m  
(c) Promoting 30 m



(d) 推进 50 m  
(d) Promoting 50 m

图 3 上覆岩层移动变形破坏模拟结果

Fig. 3 Simulation results of overlying strata movement deformation and destruction

3)如图 3(c)所示,当工作面推进到 30 m 时,岩层 1 出现大范围的垮落,岩层 2 逐渐垮落,由于岩层 2 属

于弱胶结岩层,岩层 2 将逐渐散落成小段状排列胶结在一起,同样岩性的岩层 3 又随着工作面的不断推进,慢慢的黏结在岩层 2 结构上,逐渐胶结形成一种貌似基本顶的岩梁结构,定义它为“类基本顶结构”,此时离层继续向控顶区上方延展。由于岩层 3 也属于弱胶结顶板,岩层 3 将逐渐与岩层 2 胶结压实形成完整的岩梁结构。因弱胶结岩层形成的“类基本顶”首先触矸,工作面继续向前推进,岩层 3 和岩层 4 之间离层量达到最大离层间隙值时,即达到上方岩层 4 的极限垮落步距时,此时岩层 4 开始下沉。

4)工作面继续向前推进至 50 m 时,如图 3(d)所示,基本顶岩层 4 极限垮落步距后,发生断裂,将部分作用力直接作用在“类基本顶结构”上,此时完成一次初次来压过程。

### 3.2 浅埋弱胶结上覆顶板结构周期来压阶段

当回采工作面推进至 65 m 时,顶板破断结构形态如图 4 所示,随着工作面的继续推进,直接顶岩层出现离层垮落,直接顶上方岩层下沉黏结,基本顶破断下方触矸,此时完成第一次周期来压,此后,在工作面推进到 80,95,115 m 时,弱胶结上覆岩层顶板都发生周期性断裂,由此可得到周期来压步距为 15~20 m。

## 4 现场监测结果

在 20107 工作面四联巷内布置测站,能够保证该测站处上覆岩层不受 20107 工作面开采影响,具体布置如图 5 所示。为确定开采时顶板破断规律,在钻孔内安装深部多点位移计,用于观测 20107 工作面开采过程中顶板破断规律,观测结果如图 6 所示。

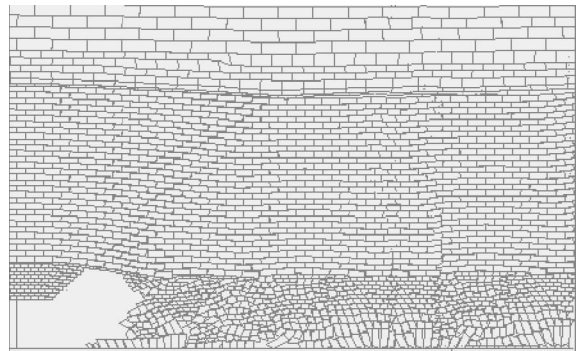


图 4 周期来压期间上覆岩层移动变形破坏模拟

Fig. 4 Deformation and failure laws of overlying strata during the periodic weighting

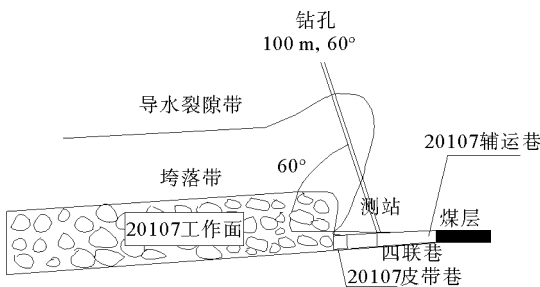


图 5 工作面测站布置

Fig. 5 Station layout

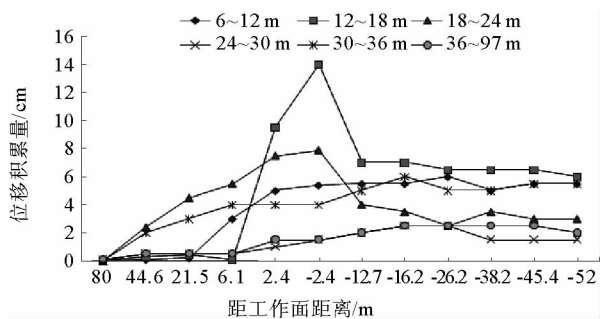


图 6 工作面顶板不同部位位移量统计图

Fig. 6 Different parts of the face roof displacement of charts

由图 6 可知,位于顶板上方 12 m 以内的岩层,随着工作面的推进顶板缓慢下沉,推进到 2.4 m 处时,位移下沉量有较小幅度增加,随后趋于稳定;位于顶板上方 12~18 m 岩层,随着工作面的推进,顶板位移下沉积累量显著增大,上部岩石垮落,顶板触矸,当工作面推过测孔 12.7 m 处时趋于稳定;位于顶板上方 18~30 m 的岩层,随着工作面的推进,顶板位移下沉积累量逐渐增大,离层向上部岩层发展,随后上部岩石垮落,带着基点下落,造成多点位移计数据变小,顶板下沉积累量出现负增长,当工作面推过测孔 12.7 m 处时趋于稳定。30~97 m 在回采工作面离测孔较远时期下沉量不大,距测孔 21.5 m 处时开始缓慢下沉,这一范围的岩层下沉量较大,出现离层,顶板弯曲下沉。

工作面还未推至测站位置时,上覆岩层开始运动,工作面推过测站约 6~30 m 时,上覆岩层运动最剧烈,超过 38~52 m 后,覆岩运动逐渐趋于稳定。通过 UDEC 数值模拟与现场监测结果相比较,验证了类基本顶结构的存在,并获得浅埋煤层弱胶结顶板运动过程,即:煤层开采后下部泥岩首先垮落→上部弱胶结岩

层之间产生离层并分别下沉→随着工作面开采下部弱胶结岩层与采空区矸石搭接,弱胶结岩层之间离层量减小,并最终搭接在一起→弱胶结岩层与上方坚硬岩层之间产生较大离层→当坚硬岩层达到极限悬露跨度后,开裂并沉降,冲压在弱胶结岩层上方。现场监测与数值模拟试验相对照,说明在模拟浅埋弱胶结顶板破断运动规律方面,文中数值模拟方法是可行的。

## 5 结论

1)利用 UDEC 模拟了开挖后岩梁在重力作用下发生离层、弯曲、沉降、开裂直至冒落的全过程,再现了顶板破断的动态发展过程,在研究顶板破断规律方面,UDEC 数值模拟方法得到很好的应用。

2)提出“类基本顶”的概念,煤层在开采过程中,由于所采煤层顶板为弱胶结岩层,在工作面推进过程中岩层将逐渐散落成小段状排列并胶结在一起,同样岩性的上部岩层又随着工作面的不断推进,慢慢地与其黏结在一起,逐渐胶结形成一种貌似基本顶的岩梁结构,定义它为“类基本顶结构”。

3)用 UDEC 数值模拟软件模拟了浅埋弱胶结顶板初次来压和周期来压过程,并结合现场监测结果分析整个来压过程中上覆岩层的顶板破断规律。煤层在开采过程中,由于所采煤层顶板为弱胶结岩层,在工作面推进的过程中先形成“类基本顶结构”,浅埋弱胶结顶板在初次来压经历直接顶垮落、形成胶结岩梁、基本顶垮落三个阶段。

### 参考文献:

- [1]范刚伟. 浅埋煤层开采与脆弱生态保护相互响应机理与工程实践[D]. 北京:中国矿业大学,2001:53-90.
- [2]黄庆享. 浅埋煤层的矿压特征与浅埋煤层定义[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(8):1174-1177.  
Huang Qingxiang. Ground pressure behavior and definition of shallow seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(8):1174-1177.
- [3]郝志勇,林柏泉,张家山. 基于 UDEC 的保护层开采中覆岩移动规律的数值模拟与分析[J]. 中国矿业,2007,16(7):81-84.  
Hao Zhiyong, Lin Boquan, Zhang Jiashan. Numerical simulation and analysis of the law of overlaying strata movement in the mining of protective layers of coal seams based on UDEC[J]. China Mining Magazine,2007,16(7):81-84.
- [4]高登云,高登彦. 大柳塔煤矿薄基岩浅埋煤层工作面矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术,2011,39(12):20-22.  
Gao Dengyun, Gao Dengyan. Study on mine strata pressure law of coal mining face in shallow depth seam under thin base rock in Daliuta Mine[J]. Coal Science and Technology,2011,39(12):20-22.
- [5]许家林,朱卫兵,王晓振. 浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J]. 煤炭学报,2009,34(7):865-869.  
Xu Jialin, Zhu Weibing, Wang Xiaozhen. Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2009,34(7):865-869.
- [6]陈荣华,白海波,冯梅梅. 综放面覆岩导水裂隙带高度的确定[J]. 采矿与安全工程学报,2006,23(2):220-223.  
Chen Ronghua, Bai Haibo, Feng Meimei. Determination of the height of water flowing fractured zone in overburden strata above fully-mechanized top coal caving face [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2006,23(2):220-223.
- [7]李涛,李文平,常金源. 陕北浅埋煤层开采隔水土层渗透性变化特征[J]. 采矿与安全工程学报,2011,28(1):127-131.  
Li Tao, Li Wenping, Chang Jinyuan. Permeability features of water resistant clay layer in northern Shaanxi province while shallowly buried coal mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2011,28(1):127-131.

(责任编辑:吕海亮)