

冲击性顶板运动及其应力演化特征的 3DEC 模拟研究

潘俊锋, 齐庆新, 毛德兵, 任 勇
(煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘要: 采用三维离散元程序建立煤层综放开采模型, 研究综放工作面推进过程中采场、采空区上覆顶板岩层的冲击性运动形式和分段性垮落形态, 记录并且分析采场动态推进过程中, 采动围岩中岩层块体垂直应力、水平应力的动态演化特征。研究结果表明, 采空区基本顶的运动形式、来压周期、来压强度与直接顶的垮落厚度有关; 支架后方的直接顶挤压成拱缓冲了基本顶的来压冲击强度, 同时也改变了其来压步距。随着工作面向跟踪块体方向的推进, 块体垂向应力、水平应力存在高低应力分区, 并且不断地波动, 岩层应力峰值位置随着岩层高度的增加稍向煤壁前方移动。

关键词: 采矿工程; 顶板运动; 采动应力; 综放开采; 冲击强度; 高强度开采

中图分类号: TD 32

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3546 - 07

STUDY ON MOVEMENT AND STRESS EVOLUTIONARY PROCESS OF IMPACTED ROOF WITH 3DEC

PAN Junfeng, QI Qingxin, MAO Debing, REN Yong
(*Beijing Mining Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013*)

Abstract: The model of long wall top-coal caving is established with three-dimensional discrete element method (3DEC) to study the impact movements of stope, mined-out area and roof strata and the segmentation falling are formed in actual mining at comprehensive mining face. The vertical stress and horizontal stress evolutionary process of mining rockmass are recorded and analyzed during the course of the stope moving. The research results indicate that the movement forms, roof pressurization period and strength of main roof have relationship with the drop thickness of immediate roof in mined-out area; the pressure arch formed by immediate roof behind hydraulic power support can buffer the roof pressurization strength of main roof, and at the same time, the roof pressurization period is modified. The block vertical stress and horizontal stress present high and low area divisions, i. e. the stress concentration exists in tracking rock block and the stress concentration degree continually fluctuates with the working face closing up to the tracking rock block. With the height of rock stratum increasing, the peak stress moves to the front of coal face.

Key words: mining engineering; roof movement; mine-induced stress; top-coal caving; pressure strength; high tension coal mining

收稿日期: 2007 - 04 - 23; **修回日期:** 2007 - 05 - 23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB221504); 国家自然科学基金资助项目(50544010)

作者简介: 潘俊锋(1979 -), 男, 硕士, 2006 年于煤炭科学研究总院采矿工程专业获硕士学位, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: panjunfeng@yeah.net

1 引言

近年来, 随着我国部分煤矿逐渐向综采放顶煤、大采高综采等高强度开采方式的转变, 井下煤炭的快速采出, 造成大面积采空区的快速形成, 加上矿井开拓设计与采掘顺序上的不合理, 采空区顶板尤其是深部具有冲击倾向性的坚硬顶板运动及其带来的动力载荷是综放工作面以及巷道冲击地压、顶板事故发生的主要诱发因素^[1~3], 例如兖矿集团南屯煤矿 2007 年发生的“3.13”冲击地压事故, 正是采场推进到与工作面长度相当的位置时, 由于采空区高位岩层的瞬间垮落, 诱发了工作面中巷冲击地压的发生。为此, 国内外学者^[4~11]对于煤层开采顶板岩层的运动以及应力分布规律开展了相关研究工作, 并且取得了一定的成果, 但是由于受研究手段的限制, 对于采空区覆岩运动形态以及采空区岩体中应力变化规律研究得不够深入。理论研究和生产实践都证明, 冲击地压、矿震以及顶板事故几乎都与采掘工作面推进过程中覆岩运动破坏和采动围岩应力场应力大小及分布密切联系在一起。然而, 煤层的开采, 尤其是工作面不断推进过程中, 采空区顶板岩体在形态和结构上均呈现出强烈的不连续性, 其运动演化过程是几何或材料非线性的结果^[9, 10, 12], 离散元法是 20 世纪 70 年代初兴起的一种数值计算方法, 特别适用于非连续介质、节理岩体的应力分析, 在采矿工程、隧道工程、边坡工程以及放矿力学等方面都有一定的应用^[13~17]。本文选取国内典型的冲击地压矿井华丰煤矿四层煤的煤岩地质赋存条件, 采用美国 Itasca 公司研制的大型三维离散元软件 3DEC 建立煤层综放开采模型, 实现综放开采采场、采空区顶板岩层在工作面推进过程中的运动规律以及采动围岩(包括不同层位)中采岩层块体应力动态演化特征的研究, 其研究成果形成规律性认识以指导生产。

2 数值模拟

2.1 数值模拟软件

离散元法引入我国相对较晚, 在岩土工程界的有些学术论文中将离散元法(discrete element method)、个别元素法(distinct element code)、不连续变形分析法(discontinuous deformation analysis)等混为一谈。1992 年 Cundall 和 Hart 认为只有满足下面 2 个条件的计算程序^[18]才可称之为离散元法:

(1) 允许块体产生有限位移和旋转, 并允许块体间完全分离。

(2) 在运算过程中, 必须能自动判别各块体间的接触点。

同年, Cundall 和 Hart 指出符合离散元定义的程序主要有:

(1) 个别元素法程序(distinct element programs)。其代表程序有 TRUBAL, UDEC, 3DEC, DIBS, 3DSHEAR 和 PFC。这些程序使用显式的, 与时俱进的方式直接解答运动等式。块体可以是刚性的, 也可以是变形的(子划分成单元), 接触也可以变形。

(2) 模态法。其代表程序为 CICE。这种方法与刚性体的离散元很相似, 但是对于变形块体使用了模态叠加。

(3) 不连续变形分析法。其对应的计算程序便为 DDA。这种方法, 接触是刚性的, 块体可以是刚性的也可以是变形的, 通过迭代格式来取得非相互贯通的条件, 块体变形来自与应变模式的叠加。

(4) 惯量 - 交换法。这种方法接触和块体都是刚性的, 在瞬间的碰撞过程中 2 个接触的块体交换惯量, 可以表示摩擦滑动。

3DEC 将岩体视为由许多完整岩块所组成, 各完整岩块间由岩体中的不连续面分隔, 而各完整岩块与岩块间的接触面视为岩块的边界。完整岩块可被模拟成刚体(rigid block)或可变形体(deformable block), 3DEC 在模拟可变形岩块时, 将岩块自动分割成许多次级块体(sub-block), 每个次级块体可配合所选用的材料组成律及外力作用情况, 计算岩块的受力及应力分布情况。在节理的模拟方面, 主要根据位移 - 作用力法则, 计算岩块在节理面上的剪应力及正应力, 作为岩块的应力边界条件, 因此可模拟岩块大位移与转动的情况。

2.2 模型物理力学参数

数值模拟计算所用煤岩物理力学参数主要来自实验室试验。同时, 由于自然界岩体富含节理和弱面, 其力学参数往往比实验室所用岩块的力学参数小很多。因此, 煤岩体的力学参数取试验所得数据的 1/2~1/20。数值模拟计算所用参数如表 1, 2 所示。

2.3 模型边界条件

3DEC 真正体现了自然界煤岩体处于真三轴的应力状态。模型具有 6 个自由面, 水平方向和底部边界采用取薄层的方法进行速度为 0 固定。模型为

表1 煤岩层块体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of terrane block

岩层	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量 /(10^{10}Pa)	剪切模量 /(10^{10}Pa)	黏聚力 /MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa
中砂岩	40.0	2 783	6.00	5.44	6.42	50.0	12.20
粗砂岩	20.0	2 773	5.44	5.12	3.92	51.0	6.65
粉砂岩	16.0	2 738	4.44	4.12	2.97	51.0	8.65
中砂岩	6.0	2 656	4.25	4.45	2.40	40.0	9.30
煤层	6.0	1 462	0.27	0.12	1.34	30.0	2.06
中砂岩	2.0	2 679	3.34	2.84	1.57	35.8	5.50
粉砂岩	4.0	2 731	4.34	4.28	1.48	51.8	6.32
粗砂岩	36.0	2 686	6.26	5.90	1.19	47.8	9.41

表2 煤岩层接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of terrane block contact face

岩层	法向刚度 /(10^{10}Pa)	切向刚度 /(10^{10}Pa)	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa
中砂岩	0.80	0.80	0.12	20.0	12.20
粗砂岩	0.60	0.40	0.87	11.0	10.35
粉砂岩	0.40	0.40	0.93	6.0	8.31
中砂岩	0.70	0.60	0.35	20.0	9.10
煤层	0.03	0.01	0.14	10.0	1.02
中砂岩	0.80	0.70	0.47	20.8	9.70
粉砂岩	0.40	0.40	0.39	7.0	8.61
粗砂岩	0.60	0.40	0.84	12.8	9.71

单一煤层开采，煤层埋深为 670 m，模型顶部之上顶板按等效载荷施加到模型顶部边界上，等效载荷按下式计算：

$$q = \sum h\rho g \quad (1)$$

式中： q 为等效载荷(N/m^2)； h 为未模拟煤岩层厚度(m)； ρ 为未模拟煤岩层密度(kg/m^3)； g 为重力加速度，一般取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ 。

各单元在运动时一般不发生弹跳，这是由于运动时其动能转化为热能而耗散掉的缘故，因此煤岩块的运动是不可逆的过程。为避免岩块在平衡位置振动，应加入阻尼来吸收系统的动能，计算采用了自适应阻尼。

2.4 模拟方案

煤层开采采用厚煤层一次采全高的综放开采，割煤高度和放煤高度都为 3 m，采放比 1 : 1，考虑到放煤损失，顶煤留出 1 m 不放煤。全部垮落法管理顶板。模拟工作面两侧均未采动，工作面控顶区采用等效边界力进行支护，支护强度为 0.7 MPa。为了研究模型开挖过程中，岩层的运动和应力变化情况，对开挖煤层上覆岩层的不同位置一些块体进

行了跟踪记录。总的离散元模型计算共分 6 个开采方案，各方案推进距离不等。

3 结果分析

3.1 顶板岩层运动规律

3.1.1 上覆岩层沿工作面推进方向的运动规律

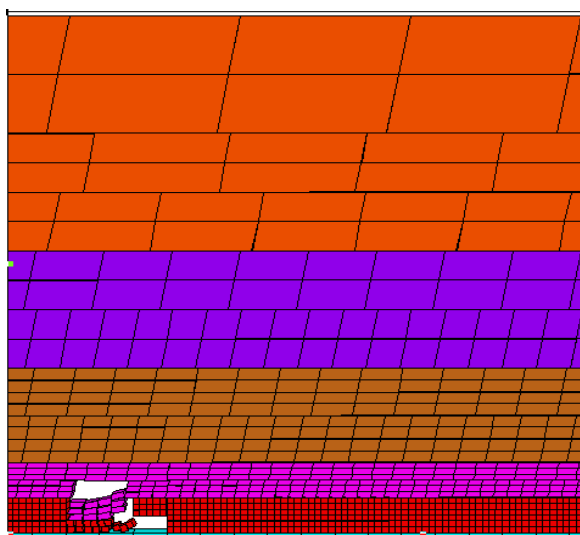
图 1 为采煤工作面不同推进距离时采场上覆岩层运动状态图。当工作面自切眼后帮推进到 16 m 时，采空区残留顶煤和下位直接顶一起冒落。当工作面推进到 30 m 时采空区残留顶煤和下位直接顶向工作面推进方向延续冒落，并且出现了分段现象，这是因为块体冒落时间先后顺序造成的。当工作面推进到 38 m 时直接顶全部冒落，基本顶开始离层，下沉，直接顶在推进方向破坏深入到支架上方的控顶区大约 2 m 左右。推进 42 m 时，以至于到后来的 90 m，采场才达到充分采动。从图中看到随着工作面的不断推进，残留顶煤、直接顶、基本顶等都在向工作面推进方向不断延续冒落，并出现了大致的分段性，分段长度因各岩层强度不同而不同，但是，自下往上垮落步距呈增大趋势。

3.1.2 上覆岩层在模型纵向的运动规律

由图 1 可知，当工作面推进 16 m 时，采空区残留顶煤和下位直接顶一起冒落。当工作面推进到 30 m 时采空区残留顶煤和下位直接顶一起冒落，中位直接顶和上位直接顶之间出现了明显的离层，中位直接顶成暂时稳定梁结构。上位直接顶开始向下弯曲，出现了一定的挠度。工作面推进到 38 m 时，基本顶离层空隙增大，上部粉砂岩出现了离层。推进到 42 m 时采空区残留顶煤和下位直接顶接底板并且基本压实，上下位直接顶在模型纵向方向出现了较大的间隙，上位直接顶以暂时稳定梁的功能对基本顶起到了支撑作用。随着工作面的不断推进，各岩层呈离层出现 - 下沉 - 离层闭合 - 压实规律，而在支架后方的顶板有成拱现象，这与冲击危险性煤层存在的水平应力较大有关，由于较大水平应力的作用，各岩层块体在垮落过程中被迫互相挤压，形成应力集中，另一方面，各块体在下落过程中发生松弛接触，又在水平应力作用下产生微小的转动，这种转动同样使楔紧力增大，因而在各层块体沿着接触面滑移并伴随着块体微小转动的运动过程中，在各岩层位中会出现极限平衡的自然平衡拱。

3.2 采场应力动态演化特征

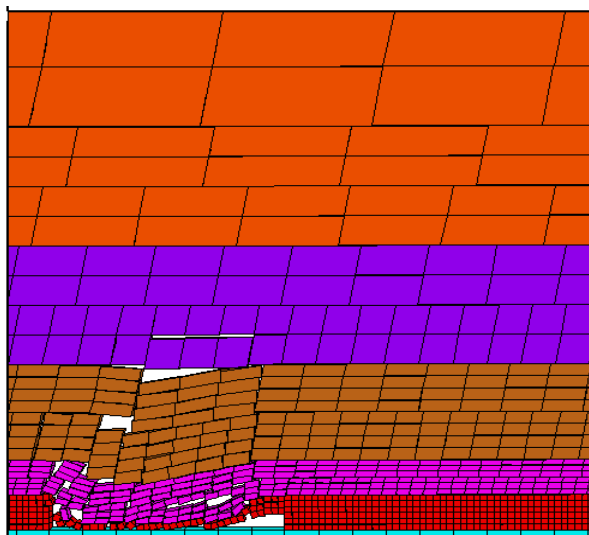
3.2.1 岩层垂直方向应力分布规律



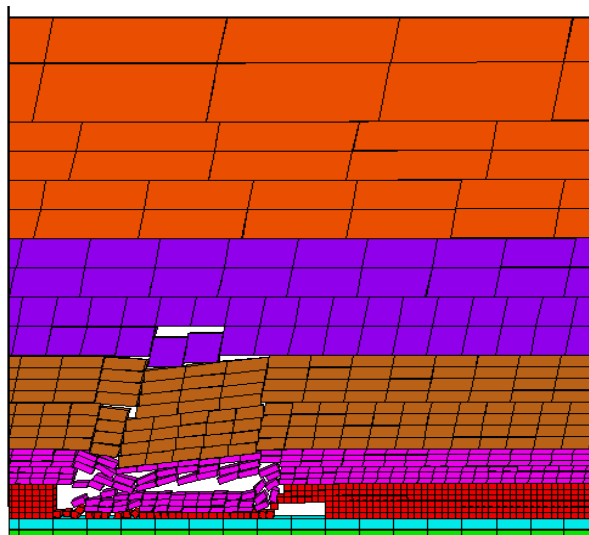
(a) 工作面推进 16 m



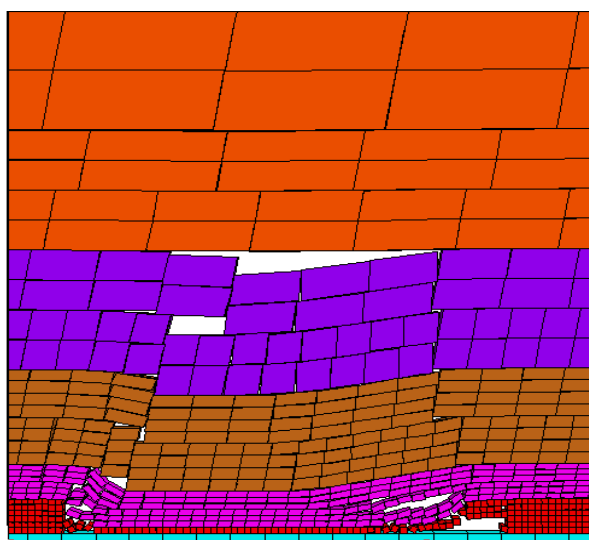
(b) 工作面推进 30 m



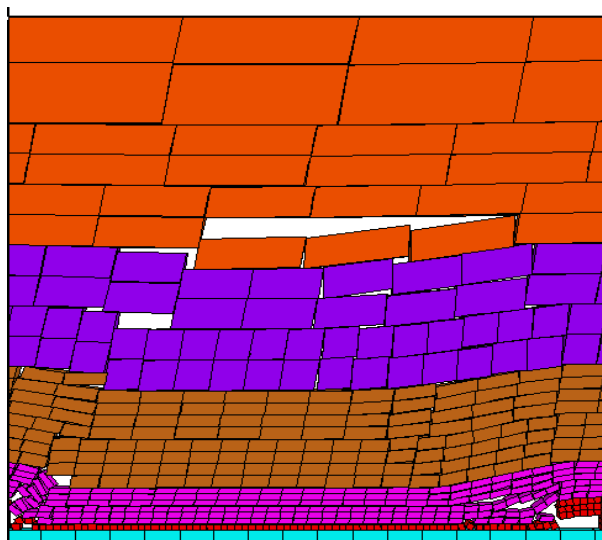
(c) 工作面推进 38 m



(d) 工作面推进 42 m



(e) 工作面推进 66 m



(f) 工作面推进 90 m

图 1 不同推进距离采场岩层运动状态图

Fig.1 State graphs of moving rock stratum with different mining distances in stope

在采用 3DEC 计算时,利用 3DEC 中的 Hist 语句对采场覆岩中不同位置的块体应力变化进行了跟踪记录。图 2, 3 分别为工作面开挖到 42, 120 m 时,采场上覆岩层中两组水平方向的跟踪块体在垂直方向的应力变化曲线。从图中可以看出,工作面前方出现了应力集中区,工作面后方出现了应力卸压区,工作面上方应力较小,应力峰值位置随着岩层高度的增加稍向煤壁前方移动。

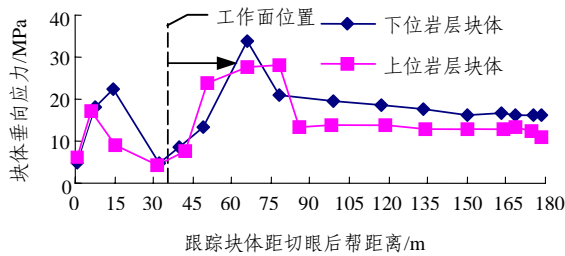


图 2 开挖至 42 m 时水平岩层垂向应力曲线

Fig.2 Vertical stress curves of horizontal rock stratum when mining to 42 m

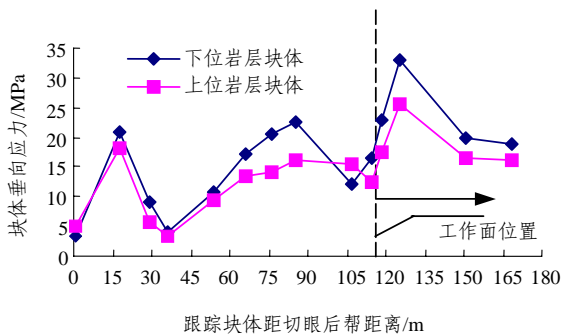


图 3 开挖至 120 m 时水平岩层垂向应力曲线

Fig.3 Vertical stress curves of horizontal rock stratum when mining to 120 m

图 4, 5 是模型整个开挖过程中,距切眼距离分别为 42, 66 m 处的上覆岩层中竖直方向上距煤层底板不同高度的部分跟踪块体的垂向应力变化曲线。从两图中可以发现,随着采煤工作面向跟踪块体方向的靠近,跟踪块体垂向应力在不断的增大。当工作面推进到跟踪块体正下方时,应力达到最大值。工作面推过块体下方位置后,垂直应力迅速下降,并降为最小值。随着工作面的远离,应力又有所回升。因此,可以认为上覆岩层在整个工作面推进过程中垂向应力是在不断变化的。

3.2.2 岩层水平方向应力分布规律

图 6 所示为距切眼 66 m 处的上覆岩层中距煤层底板不同高度的部分跟踪块体的水平应力变化曲

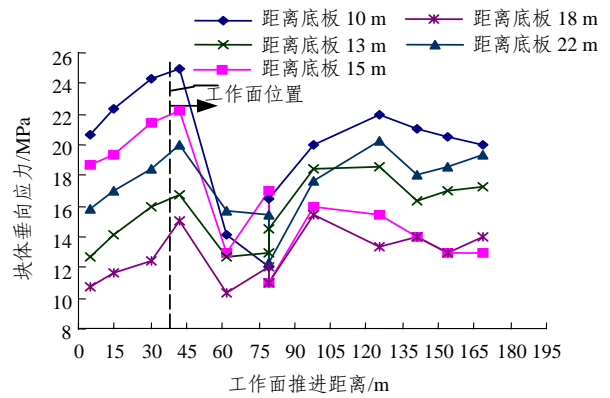


图 4 距切眼 42 m 覆岩中块体垂向应力变化曲线

Fig.4 Vertical stress curves of roof rock stratum 42 m from cut

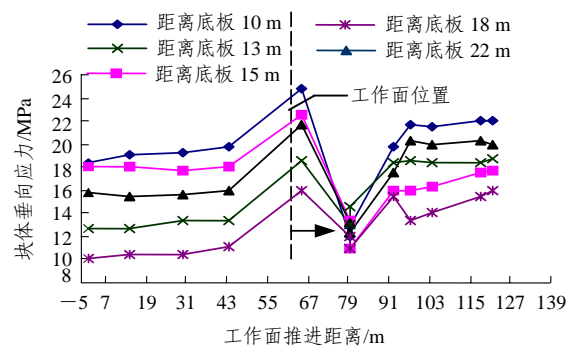


图 5 距切眼 66 m 覆岩中块体垂向应力变化曲线

Fig.5 Vertical stress curves of roof rock stratum 66 m from cut

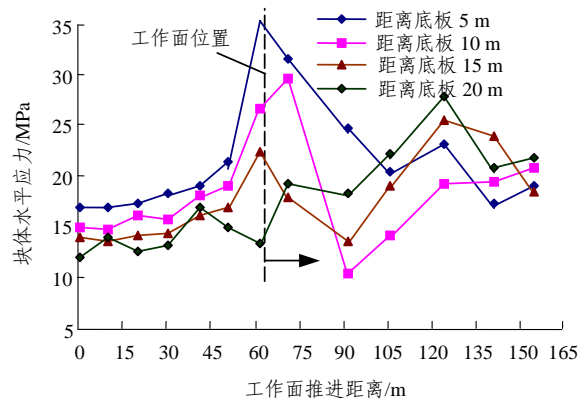


图 6 距切眼 66 m 覆岩中块体水平应力变化曲线

Fig.6 Horizontal stress curves of roof rock stratum 66 m from cut

线。从图 6 中可以发现,在工作面推进过程中岩体中的水平应力也是不断变化的。随着工作面向跟踪块体方向的推进,水平应力不断增大。当工作面距离跟踪块体还有一定距离时,水平应力已达到最大值。工作面推到块体正下方或者超过块体时,水平应力降为最小值。随着工作面的继续推进,水平应

力在不断的波动, 说明在工作面推进过程中采场围岩各岩层块体在处于不停地运动状态中。随着工作面的远离, 水平应力的波动幅度越来越小, 最后基本趋于稳定。

由图 6 还可知, 随着岩层距离煤层底板高度的不同, 最大水平应力值的大小不同, 最大水平应力出现的时间先后也不一样, 随着岩层距离煤层底板高度的增大, 最大水平应力逐渐变小, 最大水平应力峰值出现的时间也越晚。

图 7 是在工作面推进到 45 m 的过程中, 对采场上覆岩层中不同层位的两组水平方向上的块体的水平应力的跟踪记录。从图 7 中可以发现, 在采空区内上位岩层块体水平应力大于下位岩层, 这是因为, 上位岩层跟踪块体位于基本顶中, 在岩层垮落过程中, 基本顶岩层强度大, 各块体之间相互楔挤, 存在较大的水平应力集中。两层位岩层在工作面前方都有应力集中现象, 但峰值位置及大小都不同, 下位岩层峰值来的晚些但比较大。在工作面煤壁前方两者变化基本一致。

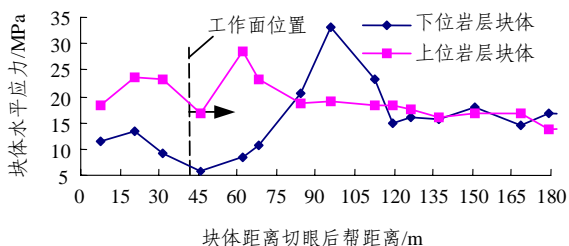


图 7 开挖至 45 m 时水平岩层中块体水平应力变化曲线
Fig.7 Horizontal stress graph of horizontal rock stratum when mining to 45 m

4 结 论

(1) 数值模拟结果表明, 采空区各岩层呈离层出现 - 下沉 - 离层闭合 - 压实规律, 在直接顶垮落后, 在基本顶和直接顶之间出现空洞并随着工作面推进而进一步发展, 导致基本顶岩块挤压拱失稳垮落。这种垮落一般会周期性出现, 并带有冲击性, 从而引起工作面周期来压。这种特征反映了直接顶垮落厚度对于基本顶运动形态的重要影响。

(2) 通过对综放工作面推进过程中采动覆岩中距离煤层直接底板不同高度的部分块体应力跟踪记录发现, 随着工作面向块体方向的推进, 垂向应力、水平应力都在不断增大; 当工作面推过块体后, 两

种应力基本都在减小; 而随着工作面的远离, 这两种应力有波动现象, 说明煤层上方的岩块在由煤壁前方位变为煤壁正上方位置时充当了采场掩护压力拱组件。

(3) 3DEC 模拟结果较真实的反映了采空区冲击性顶板岩层的垮落形态, 并且较直观的展现了采场周期性来压的形成过程。通过对采动覆岩中运动块体垂向应力、水平应力的跟踪记录, 可对采场围岩的应力动态演化特征有所了解。

参考文献(References):

- [1] 潘俊锋. 冲击危险性厚煤层采动应力场特征研究[硕士学位论文][D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2006: 26 - 41.(PAN Junfeng. Study on characteristics of mine-induced stress field in thick coal seam with rock burst hazard[M. S. Thesis][D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2006: 26 - 41.(in Chinese))
- [2] 齐庆新, 王永秀, 毛德兵, 等. 非坚硬顶板条件下高强度开采采动诱发冲击地压机理初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 5 002 - 5 006.(QI Qingxin, WANG Yongxiu, MAO Debing, et al. Study on rockburst mechanics induced by high tension coal mining in the non-hard roof conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 5 002 - 5 006.(in Chinese))
- [3] 王述红, 刘建新, 唐春安, 等. 煤矿开采过程冲击地压发生机理及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 480 - 2 483.(WANG Shuhong, LIU Jianxin, TANG Chun'an, et al. Study on generation and numerical simulation of impact pressure in coal layer mining process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 480 - 2 483.(in Chinese))
- [4] 宋振骥. 实用矿山压力[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1988: 41 - 78.(SONG Zhenqi. Practical ground pressure[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1988: 41 - 78.(in Chinese))
- [5] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力及其控制[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.(QIAN Minggao, LIU Tingcheng. Ground pressure and strata control[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984.(in Chinese))
- [6] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 30 - 86.(QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. Theory of key stratum in ground control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000: 30 - 86.(in Chinese))
- [7] 马庆云, 赵晓东, 宋振骥. 采场老顶岩梁的超前破断与矿山压力[J].

- 煤炭学报, 2001, 26(5): 473 - 476.(MA Qingyun, ZHAO Xiaodong, SONG Zhenqi. Failure of main roof ahead of workface and ground pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 473 - 476.(in Chinese))
- [8] 刘传孝. 坚硬顶板运动特征的数值模拟及非线性动力学分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 759 - 762.(LIU Chuanxiao. Numerical simulation of moving features of hard roof with three-dimensional discrete element method and nonlinear dynamic analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 759 - 762.(in Chinese))
- [9] KAISER P K, TANG C A. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release during brittle rock failure, part I: rib pillar collapse[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 35(2): 123 - 134.
- [10] LIU C X, JIANG J Q. Numerical simulation of slope stability, with 3DEC, and verification in field, by the GPR[C]// International Symposium on Rock Engineering for Mountainous Regions and Workshop on Volcanic Rocks. Portugal, Lisboa: [s. n.], 2002: 234 - 237.
- [11] 史红, 姜福兴. 采场上覆大厚度坚硬岩层破断规律的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3 066 - 3 069.(SHI Hong, JIANG Fuxing. Mechanics analysis of rupture regularity of hard and massive overlying strata of longwall face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3 066 - 3 069.(in Chinese))
- [12] 刘传孝. 无人工作面开采坚硬顶板冲击运动的3DEC数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 285 - 287.(LIU Chuanxiao. Numerical simulation study with 3DEC on impacted movement of hard roof in manless working face extraction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.2): 285 - 287.(in Chinese))
- [13] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学发展, 2003, 33(4): 483 - 485.(LIU Kaixin, GAO Lingtian. The comments of discrete element method[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 483 - 485.(in Chinese))
- [14] KAISER P K, MARTIN C D, SHARP J, et al. Underground works in hard rock tunnelling and mining[M]. Melbourne, Australia: Technomic Publishing Co., 2000: 841 - 926.
- [15] CUNDALL P A, HART R D. Numerical modeling of discontinues[C]// HUDSON J A ed. Comprehensive Rock Engineering. London: Pergamon Press Ltd., 1993: 231 - 243.
- [16] CUNDALL P A. Computer model for simulating progressive large scale movement in block rock system[C]// Symposium on ISRM, 1971: 129 - 136.
- [17] IWASHITA K, ODA M. Micro-deformation mechanism of shear banding process based on modified distinct element method[J]. Powder Technology, 2000, 109(1): 192 - 205.
- [18] Itasca Consulting Group. 3DEC: 3D distinct element code[R]. Version 3.00, [S. l.]: Itasca Consulting Group, 2002.