第 37 卷第 3 期　　煤　炭　学　报　　Vol. 37　No. 3
2012 年　3 月　　JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY　　Mar.　2012

文章编号:0253 - 9993(2012)03 - 0366 - 06

浅埋厚煤层大采高工作面顶板岩层断裂演化规律的模拟研究

付玉平[1,2],宋选民[1],邢平伟[1],张建华[1]

(1. 太原理工大学 采矿工艺研究所,山西 太原　030024;2. 太原科技大学 环境与安全学院,山西 太原　030024)

摘　要: 根据神东矿区上湾矿 1^{-2}煤层的赋存条件,运用 1∶50 的大比例相似模拟试验,研究了 5.5 m大采高综采工作面顶板垮落特征、顶板断裂位置及顶板垮落带和裂缝带"两带"高度等。研究结果表明:① 直接顶岩层分层垮落形成松散块体,难以充满采空区;② 由于一次采出的煤层厚度大幅度增加,原有直接顶远不能充填满采空区,基本顶的下位岩层分层垮落后,不能形成铰结结构,采高的增大使得直接顶的范围变大;③ 周期来压前,顶板的断裂位置一般超前工作面7.65 m;④ 顶板垮落带和裂缝带"两带"的高度呈现台阶式上升。

关键词: 浅埋煤层;大采高工作面;"两带"高度;相似模拟试验;演化规律

中图分类号: TD322.1　　**文献标志码:** A

Study on simulation of caving and evolution law of roof strata of large mining height workface in shallow thick coal seam

FU Yu-ping[1,2],SONG Xuan-min[1],XING Ping-wei[1],ZHANG Jian-hua[1]

(1. *Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*; 2. *School of Environment and Safery, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: Based on the condition of No. 1^{-2} coal seam of Shendong minging area Shangwan Coal Mine, the caving characteristics, the fracture position and caving zone and fracture zone "two belts" height of the 5.5 m large mining height workface's roof were studied by similar simulation test, with geometric similarity ratio 1∶50. The results show that the immediate roof caves stratified to loose blocks, and the goaf can not be full of these loose blocks; because of the increasing of mining height at one time, and the original immediate roof is far from full of goaf, the lower basic roof can not form hinge structure after it collapse, and the increasing of mining height evolves into the increasing of immidiate roof; before periodic weighting, fracture position of roof usually advance beyond working face 7.65 m; the height of two belts presents step increasing.

Key words: shallow coal seam; large mining height workface; the height of two belts; similar simulation test; law of evolution

目前及今后相当一段时期,神东矿区各开采区域大部集中在埋深 100 ~ 150 m 的浅部。埋深浅,基岩薄,上覆厚松散沙层是该矿区煤层赋存的典型特征。矿区煤层倾角近水平,赋存稳定,开采条件较优越。但矿井初期开采实践表明,煤层埋藏浅矿压显现并不一定像人们想的那样缓和,长壁开采工作面普遍存在顶板台阶下沉现象,并伴有涌水和溃沙[1-4]。矿压显现剧烈严重影响着开采的安全性、产量和效益。

国内对于浅埋煤层开采矿压显现问题的研究最早开始于 1990 年,侯忠杰[5]对华能精煤神府公司大柳煤矿 C202 试采工作面进行了实测。实测表明,平巷矿压显现缓和,但工作面周期来压明显,支柱动载

收稿日期:2011-04-25　　责任编辑:王婉洁
基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2007BAK29B02);山西省科技攻关资助项目(200631118-02)
作者简介:付玉平(1983—),男,山东郓城人,讲师,博士。E-mail:fuyuping_1983@163.com。通讯作者:宋选民(1963—),男,教授,博士生导师。E-mail:xminsong@163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

系数 2.3 ~4.3,有明显的台阶下沉现象,台阶下沉量达 300 ~600 mm。通过实测使人们意识到埋藏浅并不等于矿压缓和,需要对浅埋煤层问题进行研究。随后石平五、黄庆享等采用理论分析、数值计算及相似模拟试验等手段研究浅埋煤层开采的矿压显现问题,取得了较多的成果[5-8]。但这些多为浅埋深、采高 3 ~4 m 条件下,矿压显现的实测、理论分析、相似模拟试验的研究[9-12]。随着开采技术及设备的进步,工作面的采高逐步加大到 4.5 ~5.5 m,现场生产中也仅仅是根据经验在加大支架的工作阻力,针对这种采高条件下的采场上覆岩层移动规律的研究很少[13-15]。本文基于此情况,对上湾煤矿 1^{-2} 煤层赋存条件下,采用相似模拟试验研究覆岩移动演化规律,丰富浅埋大采高采场覆岩移动理论,指导现场生产,具有重要的理论意义和工程应用价值。

1　煤层赋存条件

1^{-2} 煤层的开采深度最小为 55.82 m,最大为 181.7 m,平均为 118.76 m。煤厚最小为 4.45 m,最大为 6.55 m,平均为 5.5 m。煤层的倾角为 1° ~5°。煤层的直接顶为 4.16 m 的炭质泥岩,单轴抗压强度为 22.8 MPa; 基本顶为 7.27 m 的细砂岩,单轴抗压强度为 44.6 MPa。1^{-2} 煤层的顶底板厚度及岩石力学参数见表 1。

表 1　模拟开采煤层顶底板围岩的主要参数及材料配比

Table 1　Main parameters of roof and floor of simulated mining coal seam and proportioning of materials

序号	岩性	单层厚度/m	密度/(kg·m^{-3})	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	配比号	河沙/kg	水泥(石灰)/kg	可赛银/(碳酸钙)/kg	石膏/kg	水/kg	硼砂/g
1	风积沙	11.70	1 700				238.7					
2	粉砂岩	8.60	2 460	40.6	35	655	152.9		12.3	12.3	33.6	336
3	砂质泥岩	5.10	2 240	22.8	23	346	74.6	9.3		14.0	9.3	186
4	粗砂岩	10.28	2 430	36.6	35	855	185.7		11.3	11.3	20.4	204
5	细砂岩	7.03	2 500	44.6	32	955	131.9	7.2		7.2	14.3	143
6	砂质泥岩	9.80	2 240	22.8	23	337	143.3		13.4	31.4	25.6	512
7	粗砂岩	11.24	2 430	36.6	35	855	203.1		12.4	12.4	22.3	223
8	砂质泥岩	27.52	2 240	22.8	23	337	402.4		37.7	88.0	71.9	1 437
9	粗砂岩	9.89	2 430	36.6	35	855	178.7		10.9	10.9	19.6	196
10	砂质泥岩	6.17	2 240	22.8	23	337	90.2		8.5	19.7	16.1	322
11	细砂岩	7.27	2 500	44.6	32	955	136.4	7.4		7.4	14.8	148
12	砂质泥岩	4.16	2 240	22.8	23	337	60.8		5.7	13.3	10.9	217
13	1^{-2} 煤	5.50	1 480	10.5	15	373	53.1	11.6		5.0	6.6	133
14	粉砂岩	1.48	2 460	40.6	35	655	26.3		2.1	2.1	4.2	42
15	砂质泥岩	3.25	2 240	22.8	23	337	47.5		4.5	10.4	8.5	170
16	细砂岩	5.70	2 500	44.6	32	955	107.0	5.8		5.8	11.6	116

2　试验装置及模型设计

2.1　试验装置

采用平面应变相似模拟试验台,该装置的尺寸为 3.0 m×3.0 m×0.2 m(长×高×厚),试验台的四周和底板用 20 号槽钢和厚 25 mm 的有机玻璃板约束,顶部为自由端。

2.2　模型设计

煤层埋藏深度 118.76 m,厚度 5.5 m。根据原型条件和试验装置,确定几何相似比为 $C_l = 1/50$; 容重相似比 $C_\gamma = 17/25 = 0.68$; 应力相似比 $C_\alpha = C_l C_\gamma = 0.68/50 = 0.013\ 6$; 时间相似比 $C_t = \sqrt{C_l} = 0.141\ 4$。

模型长为 3 000 mm,模型的两侧边界各留 200 mm宽的煤柱,模型可模拟工作面推进长度为 2 600 mm,即可模拟工作面推进长度为 130 m。模型厚 200 mm,可模拟工作面长度为 10 m。模型中煤层底板厚度为 208.6 mm,煤层厚度为 110 mm,煤层顶板岩层及风积沙厚度为 2 375.2 mm,模型总高度为 2 693.8 mm。

2.3　模型材料及配比

考虑岩石类材料的不连续性,对实测岩石的力学强度数值,考虑 0.8 的裂隙影响系数,再根据相似理论求得模型各岩层材料的物理力学参数、选择材料配比、计算材料用量,详见表 1。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2.4 模型测试

采用 Nikon DTM－531E 型全站仪测量煤层直接顶、基本顶及上覆岩层中所布测点的坐标，用以求得测点位置模型的位移量，用数码相机记录开采过程中的典型现象。

2.5 试验过程

模型制作后，干燥到需要时间(5 d)后，打开玻璃板进行位移测点布置(图 1)。

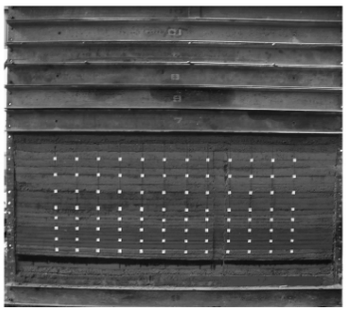


图 1 试验装置

Fig. 1 Testing installation

在模型背面开采煤层高度处设置一根可移动的 20 号槽钢，移动槽钢露出即将开采煤层。在模型左侧距离边界 200 mm(原型为 10 m)处开始挖开切眼，切眼参数为 160 mm×110 mm(原型 8.0 m×5.5 m)，切眼内放置液压支架。井下工作按照三八工作制，2 个半班割煤，半个班检修，每刀割煤时间约为 1.3 h，每刀进尺 0.8 m，则每个班割煤 6 刀，每天割煤 15 刀。根据时间和几何相似比，每刀割煤时间 11 min，进尺为 16 mm，合计每天推进度 240 mm。随着工作面向前推进，记录各位移测点数据及开采中的典型现象。

3 试验结果分析

3.1 顶板断裂垮落演化过程

(1) 直接顶初次垮落过程。

工作面推进至 15.2 m(图 2(a))，直接顶第 1 分层和第 2 分层出现离层。推进至 17.6 m(图 2(b))，直接顶第 1 分层垮落，垮落厚度为 1 m。第 2 分层与第 3 分层出现离层。推进至 20.0 m(图 2(c))，直接顶全部垮落。采空区未被垮落的直接顶充填满，最大自由空间高度为 3 m。

(2) 基本顶初次垮落过程。

推进至 29.6 m(图 3(a))，基本顶第 1、第 2 分层开始垮落。第 2 层断裂后两块相互铰接，形成三铰拱结构。推进至 40.0 m(图 3(b))，基本顶的第 3、第 4 分层垮落。推进至 50.4 m(图 3(c))，基本顶第 5 分层垮落，上覆岩层随之垮落，工作面初次来压，步距为 50.4 m。

3.2 顶板岩层下沉移动规律

随着工作面的不断推进，顶板岩层发生下沉移动，布置在岩层内部的位移测点随之移动。选取距离开采边界 30 m 的 3，27，51 和 87 号位移测点分析不同位置岩层下沉移动规律。各测点累加下沉量与工作面推进距离的关系如图 5 所示。

3 号测点位于直接顶上部，工作面的推进至测点下方，3 号测点开始缓慢下沉。推进至 35 m 时，直接顶断裂并与基本顶发生离层，下沉量为 1.2 m；推进至 40.0 m 时，基本顶发生分层垮落使直接顶进一步下沉，下沉量达 1.94 m；推进至 50.4 m 时，基本顶及



(a) 工作面推进15.2 m (b) 工作面推进17.6 m (c) 工作面推进20.0 m

图 2 直接顶初次垮落演化过程

Fig. 2 Evolution process of first collapse of immidiate roof

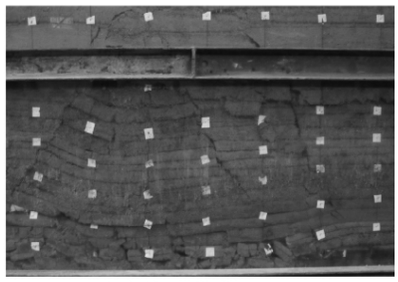
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net



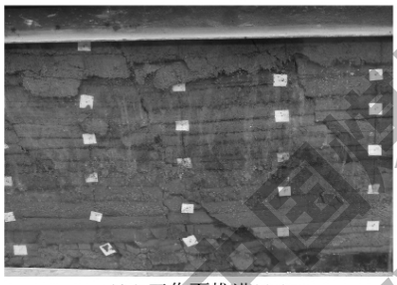
(a) 工作面推进29.6 m　　(b) 工作面推进40.0 m　　(c) 工作面推进50.4 m

图 3　基本顶初次垮落演化过程

Fig. 3　Evolution process of first collapse of basic roof



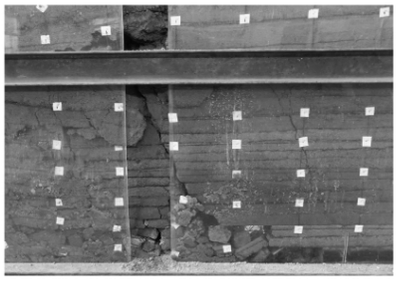
(a) 工作面推进69.6 m



(b) 工作面推进80.0 m



(c) 工作面推进100.0 m



(d) 工作面推进115.2 m

图 4　基本顶周期来压时顶板岩层垮落概貌

Fig. 4　Roof strata caving general picture of periodic weighting

上覆载荷全部垮落，对垮落的直接顶进一步压实，下

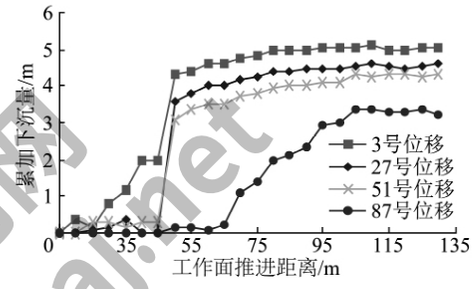


图 5　顶板累加下沉量与工作面推进距离的关系

Fig. 5　Relationship between roof convergence and workingface advanced distance

沉量达 4.29 m**；随着工作面的继续推进** 3 **号测点的累加下沉量趋于稳定，最大为** 5.06 m。

27 **号测点位于基本顶的上部，垮落前最大下沉量为** 0.38 m**；工作面推进至** 50.4 m **发生初次来压时，测点累加下沉量为** 3.61 m**；随着工作面继续推进，最终下沉量达** 4.6 m。

51 **号测点位于** 27 **号测点上方** 10 m **处的岩层，初次来压前基本无下沉；而初次来压时随着基本顶共同下沉，下沉量达** 3.04 m**；随着工作面的继续推进，最终下沉量达** 4.31 m。

87 **号测点距离煤层高度为** 45 m**，工作面推进至** 65.0 m **时，测点下沉** 0.24 m**；推进至** 80.0 m **时，下沉量达** 1.98 m**；推进至** 105.0 m **时，下沉量为** 3.38 m**，随后直至模拟结束下沉量基本不变。**

通过模拟试验布置位移测点测得的数据中可以看出，直接顶在工作面推过时，有与基本顶离层下沉趋势，工作面推过后基本上自行垮落；基本顶一般在工作面推过后才开始缓慢下沉变形，直至破断垮落；基本顶上方载荷层一般下沉变形与基本顶一致；更上方的岩层变形下沉则滞后于基本顶岩层。

3.3　基本顶的断裂位置

基本顶的断裂位置对顶板的垮落和支架载荷大小及合力作用点的位置都有很大的影响。基本顶初次来压时顶板在煤壁上方断裂，如图 6 **所示；第** 1 **次**

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

周期来压前，工作面推进至 50.4 m 时，顶板断裂位置超前煤壁 6.995 m，如图 7 所示；第 2 次周期来压前，工作面推进至 69.6 m 时，顶板断裂位置超前煤壁 6.49 m；第 3 次周期来压前，工作面推进至 80.0 m 时，顶板断裂位置超前煤壁 6.55 m；第 4 次周期来压前，工作面推进至 100.0 m 时，顶板断裂位置超前煤壁 10.57 m。周期来压前，顶板断裂位置一般超前工作面 7.65 m。

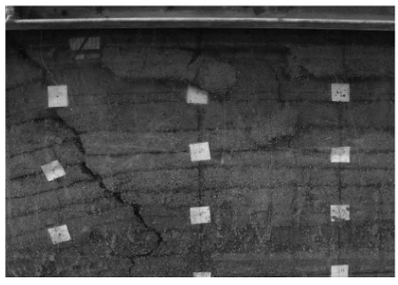


图 6 顶板岩层超前断裂位置

Fig. 6 Advance fracture position of roof strata

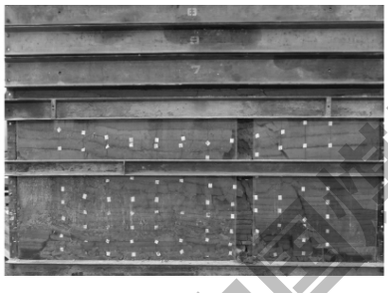


图 7 工作面推进至 130.0 m 顶板垮落

Fig. 7 Roof caving when workingface advanced 130.0 m

3.4 顶板垮落带和裂缝带“两带”高度变化规律分析

工作面开切眼布置支架后，随着工作面向前推进，直接顶逐渐变形分层垮落，基本顶岩层也逐渐变形分层垮落。基本顶全部垮落时，其上方的载荷层随之垮落，因此垮落带和裂缝带的高度之和在逐渐的变大。图 2(c) 是工作面推进 20.0 m、图 3(b) 和(c) 是工作面推进 40.0 m 和 50.4 m 时顶板垮落情况，图 4 是工作面推进至 69.6，80.0，100.0 和 115.2 m 时顶板岩层垮落情况，图 7 为工作面推进 130.0 m 模型推进至终采线时，顶板垮落概貌，具体的垮落高度见表 2。

如图 8 所示为“两带”高度随工作面推进距离变化曲线，从图上可以看出，工作面推进 40.0 m 以前，顶板垮落高度缓慢增大；工作面推进 40.0～50.8 m，基本顶分层断裂垮落，上方的载荷层随之垮落，使得垮落高度迅速增大；工作面推进至 50.8～80.0 m，基本顶全部垮落后，其上方的载荷层基本垮落完毕，所以随着工作面继续推进，顶板垮落高度变化不大；工作面推进 80.0～115.2 m，基本顶上方的粗砂岩破断垮落，使得垮落高度进一步增大。总而言之，顶板垮落带的迅速增大都是由于煤层上方坚硬岩层发生断裂失稳造成的，垮落带和裂缝带“两带”高度呈现台阶式增大。

表 2 顶板“两带”高度与工作面推进距离的关系

Table 2 Relationship of two belts height of roof and working face advanced distance

推进距离/m	“两带”高度/m
20.0	4.16
40.0	9.93
50.4	29.44
69.6	39.49
80.0	40.98
100.0	50.81
115.2	57.05
130.0	68.71

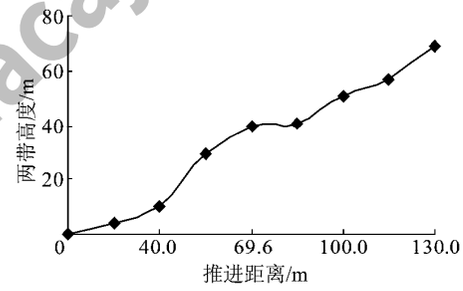


图 8 “两带”高度随工作面推进距离变化曲线

Fig. 8 Variation curve of two belts height follow working face advanced distance

4 现场实例分析

以神东公司上湾煤矿 51101 工作面的地质条件为背景，该工作面长度为 240 m，采高为 5.5 m，埋深为 100～120 m。经实测得到该工作面初次来压步距为 53.84 m，周期来压步距平均为 20.60 m。而试验所得结果初次来压步距 50.4 m，周期来压平均步距 16.2 m。现场实测与试验所得结果是一致的。

5 结 论

(1) 直接顶岩层的垮落形式为分层垮落，垮落后形成松散块体，难以充满采空区，最大自由空间高度为 3 m。

(2) 由于一次采出的煤层厚度大幅度增加，原有直接顶远不能充填满采空区，基本顶的下位岩层分层垮落后，不能形成铰结结构，使得采高的增大使得直接顶的范围变大了。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

(3) 试验中,顶板一般为超前断裂,断裂位置一般超前工作面 7.65 m。

(4) 浅埋煤层开采中,坚硬岩层的破断使得顶板垮落带和裂缝带"两带"高度呈现台阶式上升。

参考文献:

[1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社,2003.
Qian Minggao,Shi Pingwu. Underground pressure and stratum control [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press,2003.

[2] 宣以琼. 薄基岩浅埋煤层覆岩破坏移动演化规律研究 [J]. 岩土力学,2008,19(2):512 - 516.
Xuan Yiqiong. Research on movement and evolution law of breaking of overlying strata in shallow coal seam with a thin bedrock [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,19(2):512 - 516.

[3] 郭文兵,黄成飞,陈俊杰. 厚湿陷黄土层下综放开采动态地表移动特征 [J]. 煤炭学报,2010,35(S1):38 - 43.
Guo Wenbing,Huang Chengfei,Chen Junjie. The dynamic surface movement characteristics of fully mechanized caving mining under thick hydrous collapsed loess [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(S1):38 - 43.

[4] 许家林,朱卫兵,王晓振,等. 浅埋煤层覆岩关键层结构分类 [J]. 煤炭学报,2009,34(7):865 - 870.
Xu Jialin,Zhu Weibing,Wang Xiaozhen,et al. Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(7):865 - 870.

[5] 侯忠杰. 地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性分析 [J]. 煤炭学报,2000,25(2):127 - 131.
Hou Zhongjie. Analysis of combinatorial key strata stability in shallow coal seam with thick loose bed [J]. Journal of China Coal Society,2000,25(2):127 - 131.

[6] 黄庆享,钱鸣高,石平五. 浅埋煤层采场老顶周期来压的结构分析 [J]. 煤炭学报,1999,24(6):581 - 585.
Huang Qingxiang,Qian Minggao,Shi Pingwu. Structural analysis of main roof stability during periodic weighting in longwall face [J]. Journal of China Coal Society,1999,24(6):581 - 585.

[7] 杨治林,余学义,郭何明,等. 浅埋煤层长壁开采顶板岩层灾害机理研究 [J]. 岩土工程学报 2007,29(12):1763 - 1766.
Yang Zhilin,Yu Xueyi,Guo Heming,et al. Study on catastrophe mechanism for roof strata in shallow seam longwall mining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(12):1763 - 1766.

[8] 张　杰. 厚土层覆盖浅埋煤层支架适应性分析 [J]. 西安科技大学学报,2009,29(4):396 - 399.
Zhang Jie. The support applicability in shallow seam mining covered by thick soil [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2009,29(4):396 - 399.

[9] 王国旺,高登彦. 厚基岩浅埋煤层大采高工作面矿压显现规律分析 [J]. 煤炭科学技术,2010,38(7):27 - 30.
Wang Guowang,Gao Dengyan. Analysis on mine pressure behavior law of high cutting coal mining face in seam with thick overburden base rock and shallow mining depth [J]. Coal Science and Technology,2010,38(7):27 - 30.

[10] 谢大平. 浅埋煤层长壁开采的物理相似模拟试验 [J]. 六盘水师范高等专科学校学报,2010,22(3):10 - 12.
Xie Daping. The analogical simulative experimentation of shallow seam mining's longwall mining [J]. Journal of Liupanshui Teachers College,2010,22(3):10 - 12.

[11] 方新秋,郝宪杰,兰奕文. 坚硬薄基岩浅埋煤层合理强制放顶距的确定 [J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):388 - 393.
Fang Xinqiu,Hao Xianjie,Lan Yiwen. Determination of reasonable forced caving interval in shallow buried seam with hard and thin bedrock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(2):388 - 393.

[12] 刘纯贵. 马脊梁煤矿浅埋煤层开采覆岩活动规律的相似模拟 [J]. 煤炭学报,2011,36(1):7 - 11.
Liu Chungui. Similar simulation study on the movement behavior of overlying strata in shallow seam mining in Majiliang Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(1):7 - 11.

[13] 付玉平,宋选民,邢平伟,等. 大采高采场顶板断裂关键块稳定性分析 [J]. 煤炭学报,2009,34(8):1027 - 1031.
Fu Yuping,Song Xuanmin,Xing Pingwei,et al. Stability analysis on main roof key block in large mining height workface [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(8):1027 - 1031.

[14] 付玉平,宋选民,邢平伟. 浅埋煤层大采高超长工作面垮落带高度的研究 [J]. 采矿与安全工程学报,2010,27(2):190 - 194.
Fu Yuping,Song Xuanmin,Xing Pingwei. Study on the height of caving zone in large mining height and super-long face of shallow seam [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2010,27(2):190 - 194.

[15] 宋选民,顾铁凤,闫志海. 浅埋煤层大采高工作面长度增加对矿压显现的影响规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S2):4007 - 4013.
Song Xuanmin,Gu Tiefeng,Yan Zhihai. Effects of increasing working face's longth on underground pressure behaviors of mining supper-high faces under shallow coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(S2):4007 - 4013.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net