

# 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征

张玉军 高 超

(天地科技股份有限公司 开采设计事业部 北京 100013)

**摘要:**为确定急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏高度,以梅河煤矿为试验对象,基于钻孔冲洗液漏失量观测法实测的覆岩破坏高度,与UDEC软件得出的多分层开采后的覆岩裂隙演化特征和发育高度模拟结果,回归得出了水平分层综放开采导水断裂带高度预计公式。结果表明:急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏高度随着分层数的增加,最大高度受到明显抑制,裂高与累计采厚比明显减小;覆岩破坏最终发育形态呈明显的拱形,且偏于顶板一侧;覆岩垮落角将随着开采分层的增加而增大。基于以上分析,得出了梅河矿区急倾斜厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏高度的预计方法。

**关键词:**急倾斜特厚煤层;水平分层综放开采;覆岩破坏;裂隙演化

**中图分类号:** 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)01-0126-07

## Overburden rock failure features of steep thick seam horizontal slicing full-mechanized caving mining

Zhang Yujun, Gao Chao

(Department of Coal Mining & Designing, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013)

**Abstract:** In order to determine the height of overburden failure of the steep thick seam horizontal slicing fully-mechanized caving mining taking Meihe Mine as the experimental mine, the paper adopted borehole flushing fluid loss observation method to measure the overburden failure height, in combination with the overburden failure evolution characteristics and development height simulation results with UDEC software, the expected formula of water conducted zone height of horizontal slicing fully-mechanized caving mining was obtained. The results showed that the overburden failure height increased with the layers, the maximum height of overburden was significantly inhibited, the creak height and the cumulative ratio of mining depth and mining thickness was significantly decreased; the terminal development form of overburden was obvious arch type and located on the roof side; overburden caving angle increased with the increase of mining slicing number. Based on the above analysis results, the overburden failure height of steep thick seam horizontal slicing fully-mechanized caving mining in Meihe Mine was obtained.

**Key words:** steep thick seam; horizontal slicing full-mechanized caving mining; overburden failure; fracture evolution

## 0 引言

急倾斜特厚煤层水平分层综采放顶煤是近年来兴起的厚煤层机械化开采的新采煤方法。由于综放开采强度大,且开采分层数多,地点集中,因而对上覆岩层及采空区产生反复采动扰动影响,致使覆岩破坏非常严重,地表移动变形异常剧烈,且随着开采

垂高的增加,极易在地表形成较深塌陷区,将对位于塌陷区范围内的建(构)筑物、铁路和水体等造成严重的损坏,发生地表水体或含水层溃入井下的危险。煤层开采后覆岩破坏高度直接决定着水体下采煤的安全性和可靠性。因此研究覆岩破坏的发育高度及其分布形态是实现水体下安全采煤的关键<sup>[1]</sup>。目前,对特厚急倾斜煤层水平分层开采的研究较少。

收稿日期:2015-08-16;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2016.01.021

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB13B02-04)

作者简介:张玉军(1978—),男,河北怀安人,副研究员,博士。Tel:010-84264121,E-mail:zhangyujun@tdkcsj.com

引用格式:张玉军,高超.急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征[J].煤炭科学技术,2016,44(1):126-132.

Zhang Yujun, Gao Chao. Overburden rock failure features of steep thick seam horizontal slicing full-mechanized caving mining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 126-132.

国内外对特厚急倾斜煤层水平分层开采主要集中在采场矿压显现规律、基本顶结构分析等方面。石平五等<sup>[2]</sup>根据实测矿压显现特征建立了急倾斜基本顶狭长板模型,提出急倾斜煤层开采的研究顶板易于沿倾斜形成铰接岩块结构;戴华阳等<sup>[3]</sup>采用相似材料方法将特厚急倾斜煤层水平分层开采岩层移动分为浅部和深部2个阶段,得出浅部开采覆岩为应力拱结构,深部为铰接岩梁结构;杨建立等<sup>[4]</sup>通过实测获得了综放开采条件下覆岩破坏高度及基本规律;王树仁等<sup>[5]</sup>采用相似模拟和数值分析方法提出急倾斜煤层采空区空间发育的2种机制,即离层和空洞抬升机制对覆岩和地表不同破坏的影响;鞠文君等<sup>[6-7]</sup>运用相似材料模拟、数值模拟和现场实测等手段,研究了急倾斜特厚煤层分层开采的矿压特征,并建立了基本顶沿倾斜方向悬臂梁断裂的力学模型。近年来,研究者又从急倾斜特厚煤层开采覆岩裂隙演化、顶板垮断等方面研究了水煤溃泻机理以及水害的防治<sup>[8-14]</sup>。虽然众多学者对急倾斜特厚煤层水平分层综放开采的矿压规律、岩层及地表移动规律进行了研究,对特厚急倾斜煤层安全开采起到了积极的作用,但是对覆岩破坏高度和特征缺乏实测,尤其是没有提出适合于矿区的破坏高度预计方法。基于此,笔者根据梅河矿区地质采矿条件,在现场实测和数值模拟研究的基础上,回归得到水平分层综放开采的覆岩裂隙演化及破坏高度预计公式,以期为类似煤层赋存条件及开采方式下的覆岩破坏高度计算提供借鉴。

## 1 研究区概况

梅河煤矿现有一、二、三、四、六井5对生产井,全矿核定生产能力为397万t/a,其中三井、四井为急倾斜煤层,主采12号煤层,煤层厚度平均25m,煤系地层为第三系,固结程度差,顶板厚层泥岩和底板砂岩,风化后强度大幅降低,浸水后易软化。矿井先后采用水沙充填采煤方法、巷柱式采煤方法、金属网假顶采煤方法,自1989年开始采用综放采煤方法。梅河煤矿历经40余年的开采,使得地面沿煤层走向形成较深的地表塌陷区(沟),同时由于三井、四井开采煤层为急倾斜煤层,采用走向长壁后退式人工水平分层综采放顶煤方法进行开采,开采分层数多,地点集中,对上覆岩层及采空区的反复采动扰动影响,致使采空区积存大量的泥化物,极易发生溃水溃泥等灾害。

## 2 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏高度实测

### 2.1 四井水平分层综放开采导水断裂带高度实测

1) 钻孔布置。确定覆岩破坏高度采用钻孔冲洗液漏失量观测方法,该方法是一种最传统、最可靠地确定上覆岩层受采动后其导水断裂带和垮落带发育高度的方法<sup>[15]</sup>。选择在6101-1采区上方地表施工2个探测孔,全区工作面走向长350~370m,倾斜宽28~36m,开采下限标高-0.5—+4.0m,开采上限标高+4.9—+14.8m。采放高度13m,均穿过5101-3、5101-2、5101-1、4101-5、4101-4及4101-3采空区,累计采厚达到84m。“两带”探测孔布置如图1所示。

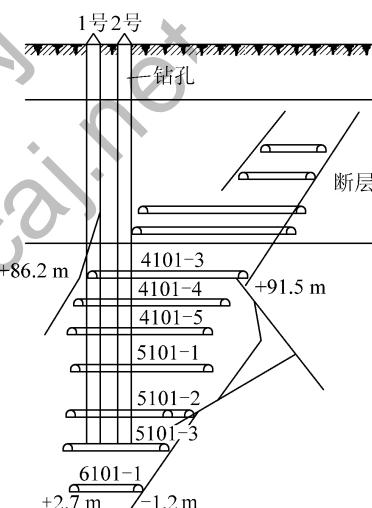


图1 探测钻孔布置剖面示意

Fig. 1 Schematic diagram of boreholes layout

2) 探测结果分析。1号钻孔冲洗液漏失量从孔深198.72m时趋于增大,随着孔深增加,漏失量增加程度明显。在孔深为202.12m处,钻孔冲洗液出现全部漏失,由此可以判断,导水断裂带顶点的孔深为202.12m。该孔的孔口标高为+339.09m,附近煤层开采厚度为13m,得到导水断裂带的高度为191.72m,裂采比为14.7,裂高与累计采厚比为2.1。

2号钻孔冲洗液漏失量观测从孔深为224.98m时趋于增大,随着孔深增加,漏失量增加程度明显。在孔深为228.56m处,钻孔冲洗液出现全部漏失,由此可以判断,导水断裂带顶点的孔深为228.56m。该孔的孔口标高为+337.16m,附近煤层开采厚度为13m,得到导水断裂带的高度为218.16m,裂采比为16.7,裂高与累计采厚比为2.39。观测结

果见表1。

表1 覆岩破坏高度实测结果

Table 1 Actual results of overlying strata damage height

矿井	钻孔	分层数	平均采厚/	断裂带高度/
			m	m
梅河四井	1号孔	7	12.0	191.72
	2号孔	7	12.0	218.16
梅河三井	91-A	3	13.6	77.40
	91-B	3	13.6	77.60
	91-C	3	13.6	84.10
	91-D	3	13.6	81.60
	92-1	4	14.7	100.10
	92-2	4	14.7	91.60
	92-3	4	14.7	103.80

## 2.2 三井水平分层综放开采覆岩破坏高度实测

在梅河三井1107区对水平分段综放开采覆岩破坏高度进行过实测。为获得导水断裂带的分布形态及其最大高度,钻孔分别布置在各采煤工作面回风巷、运输巷内侧以及采空区中心上部,钻孔布置如图2所示。通过各个钻孔冲洗液漏失量的观测,最终获得各个钻孔的断裂带发育高度(表1)。由表1可知,出现观测结果差异较大的原因主要在于多分段开采累计采厚不同,其次是由于钻孔施工与观测的时间有差异,观测时间晚导致个别钻孔位置采动覆岩已被压实,实测高度要低于最大断裂带发育高度。

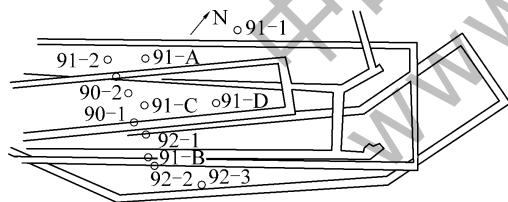


图2 观测孔布置平面示意

Fig. 2 Observation boreholes layout

## 3 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征演化模拟

### 3.1 模型的建立

根据梅河四井的生产地质条件,建立离散元平面应变数值模型。①模型X方向尺寸为700 m,垂高Z为450 m,在厚度方向取1 m。②煤层倾角取60°,为方便模拟开采过程,将模型块体沿着节理弱面切割成水平的小块体。③不同煤岩层根据物理力学性质将网格分割成大小不同、强度刚度不等的岩

块;考虑到计算机运行速度与模拟计算的准确性,网格大小整体上大小相差不大,底板网格适当加大,顶板网格大小也根据垮落带预计范围进行了合理分割。网格数目共计4 339个。模型网格划分如图3所示。



图3 模型网格划分

Fig. 3 Model grid division

各岩层单元按与煤层的远近适当划分,工作面开采引起围岩应力重新分布,数值分析过程的时步虽不能与实际开采影响的时间过程相对应,但数值分析中不同时步的应力、位移结果反映了实际开采过程中应力、位移的演化过程。建模过程中,在覆岩中设置了监测点,记录该处围岩的应力、位移等变量的变化过程。模拟步骤如下:①建立整体模型,模型原岩应力平衡计算;②按走向(分步开采)开采工作面;③模型应力平衡计算。

### 3.2 力学参数的选取

数值模拟计算所采用的煤岩物理力学参数主要来自于实验室,实际上由于自然界岩体富含节理和弱面,其力学参数通常比实验室所用岩块的力学参数小得多<sup>[16-17]</sup>。因此,煤岩体的力学参数取试验所得数据的1/2~1/20,3DEC数值模拟计算所用煤岩物理参数见表2。

### 3.3 边界条件的确定

根据研究目的和计算过程,确定如下边界条件:①模型前后和左右边界施加水平约束,即边界水平位移为零;②模型底部边界固定,即底部边界水平、垂直位移均为零;③模型顶部为自由边界;④模型具有6个自由面,其中水平方向和底部采用了取薄层法、节点速度为零固定,为了使模型与采矿相接近,在水平方向上施加由自重应力产生的渐变侧向应力;⑤不考虑构造应力,仅模拟研究覆岩在自重应力、煤岩层的倾角、顶底板岩层的原生裂隙的发育程

度、开采方法(特厚煤层分层综放开采)、开采尺寸等条件下的覆岩移动规律。

表2 数值建模煤岩层岩块和岩层节理面物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of rock block and rock joint surface

煤岩层	煤岩层岩块物理力学参数					煤岩层节理面物理力学参数						
	法向层厚/ m	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉强度/ MPa	累计厚度/ m	法向刚度/ 10 <sup>8</sup> Pa	切向刚度/ 10 <sup>8</sup> Pa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
松散层	30	1 700	1.60	0.60	23	0.2	0.8	30	6.4	2.40	0.04	15
砂质泥岩-21	40	2 350	31.2	15.6	30	2.8	2.4	40	64	15.6	0.60	22
砂质泥岩-11	30	2 300	38.0	12.8	34	2.4	2.8	30	76	12.8	0.70	26
砂质泥岩-12	170	2 400	32.0	14.8	30	3.0	2.6	170	64	14.8	0.65	22
砂质泥岩-22	52	2 400	38.4	16.8	33	2.5	2.6	52	76	16.8	0.65	25
砂质泥岩-3	52	2 300	28.8	13.4	29	2.6	2.4	52	40	13.3	0.60	21
砂质泥岩-4	52	2 300	26.8	12.4	29	2.4	2.4	52	26	12.4	4.20	21
煤层	43.3	1 400	17.2	8.20	28	1.8	1.6	43.3	32	12.3	3.10	20
中粒砂岩-3	43.3	2 300	28.8	13.4	29	2.6	2.6	43.3	70	14.8	0.60	25
砂质泥岩-23	43.3	2 400	38.4	16.8	33	2.5	2.4	43.3	76	16.8	0.65	25
砂质泥岩-13	95	2 400	32.0	14.8	30	3.0	2.6	95	64	14.8	0.65	22
砂质泥岩-5	50	2 450	44.0	24.5	35	3.2	3.6	50	88	21.4	0.90	27

### 3.4 覆岩破坏裂隙演化特征分析

图4为开采8个分层后覆岩破坏裂隙演化结果。①开采第一分层(开采垂高13 m)时,采空区上方煤层先于顶底板岩层破坏,直接顶并没有立即垮落,而是沿层理面出现微小离层裂隙,并且在分层处沿着约65°的垮落角出现断裂,此时断裂带高度约为104 m;②随着第2分层的开采,采空区上部煤体继续垮落,垮落形态呈拱型,中间高两侧低,最大垮落高度位于水平采空区中央。由于垮落的煤矸石主要向采空区底部滑落充填,使得顶板的悬露长度增大,从而加剧了覆岩的垮落范围,垮落带高度增大,此时出现垂直于岩层的断裂裂隙。断裂带高度继续向上增加不大,约为115 m;③随着煤层开采向下继续延伸(开采第3~第8分层),上方采空区堆积的煤矸石朝下方采空区滑落,从而加大了覆岩的悬露空间,为覆岩中上部岩层和上方煤体持续垮落提供了活动空间,垮落集中向上发展,使垮落范围继续保持拱形形态向上发展,在地表形成塌陷槽或塌陷漏斗,塌陷坑位于煤层露头及其附近顶板处。在反复采动的扰动下,覆岩裂隙数量进一步增加,但由于反复扰动使

得覆岩的岩性变弱,顶板方向断裂带发育高度继续向上增加不多,最终断裂带高度约为210 m。

图5为8个分层开采完后覆岩破坏高度、分布形态及裂隙演化结果。对比实测结果可知,随着分层数的增加导水断裂带发育高度增加明显减少,裂高与累计采厚比减小。

## 4 急倾斜水平分层综放开采覆岩破坏预计公式

### 4.1 预计公式回归计算

由梅河三井和四井实测结果及数值模拟结果可知,工作面多个分层开采时,裂采比为5.48~16.70,随着分层数增加,裂高与累计采厚比基本介于1.75~2.39,结果见表3。

分析实测及模拟结果可知,水平分层综放开采覆岩破坏规律符合一般分层开采覆岩破坏规律,即一般随着采厚增大,破坏高度也相应增加。重复开采时,覆岩破坏范围的最大高度一般会受到明显抑制,其垮落带高度、裂高与累计采厚比一般会明显减小<sup>[10]</sup>。因此可按照已有分层开采经验公式进行数据回归。

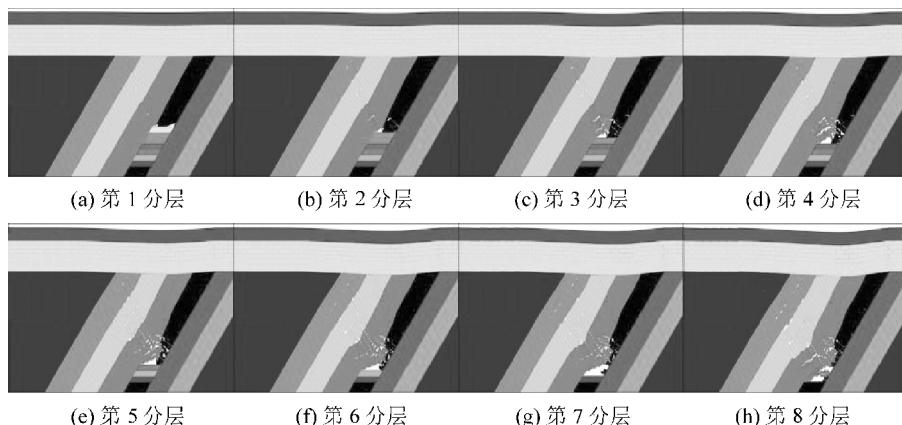


图4 水平分层综放开采覆岩破坏裂隙演化

Fig. 4 Evolution diagram of overlying strata failure in horizontal slicing caving mining

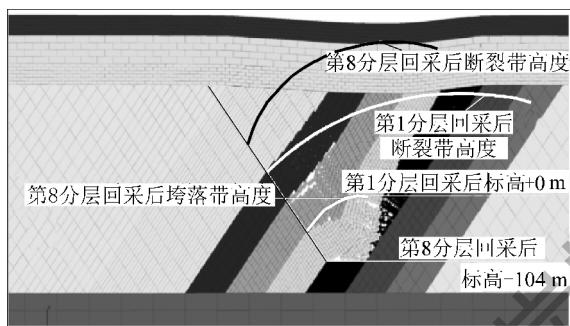


图5 8个分层开采后覆岩裂隙演化特征及发育高度

Fig. 5 Overburden rock fracture evolution and development height of 8 layers mining

按  $H_{li} = \frac{100M}{aM + b}$  公式线性回归计算, 得  $a = -0.208855$   $b = 63.4085$ 。方程中误差  $d = 5.89201$ 。即  $H_{li} = \frac{100M}{63.41 - 0.21M} \pm 5.89 (41.3 \leq M \leq 104.0)$  (1)

按照  $H_{li} = a\sqrt{M} + b$  公式线性回归计算得到  $a = 41.7082$   $b = -197.173$  即

$$H_{li} = 41.71\sqrt{M} - 197.17 (41.3 \leq M \leq 104.0) \quad (2)$$

回归公式计算值与实测值比较见表4和图6, 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩导水断裂带高度按实测回归公式计算, 公式(1)计算结果与实测值差值率为2.6%~17.7%, 平均13.0%; 公式(2)计算结果与实测值差值率为0.3%~19.4%, 平均6.5%。回归公式(2)适用性明显强于回归公式(1)。

#### 4.2 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏特征及预计方法

通过上述分析, 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏有以下3个特征。

表3 覆岩导水断裂带高度实测及模拟结果

Table 3 Water conducted zone height of overburden rock measured and simulated results

项目	采区	分层数	采厚 /m	累计采厚 /m	裂高 /m	裂采比	裂高与累计采厚比
	2103	3	13.6	41.3	74.5	5.48	2.00
	2103	3	13.6	41.3	76.7	5.64	2.07
梅河	2103	4	13.4	54.7	104.3	7.78	1.91
三井	1107	3	13.6	44.6	84.1	6.18	1.88
(实测)	1107	3	13.6	44.6	81.6	6.00	1.82
	1107	4	14.7	59.3	103.8	7.06	1.75
	1107	4	14.7	52.8	100.1	12.50	1.89
梅河四井	6101	7	13.0	91.0	191.72	14.70	2.10
(实测)	6101	7	13.0	91.0	218.16	16.70	2.39
模拟结果	—	8	13.0	104.0	206.00	15.80	1.98

表4 理论计算与实测值结果比较

Table 4 Comparison between theoretical and experimental results

采区	分层数	累计采厚 /m	实测裂高 /m	式(1)与实测值差值率 /%		式(2)与实测值差值率 /%	
				计算值 /m	差值率 /%	计算值 /m	差值率 /%
2103	3	41.3	74.50	81.3	9.1	70.8	-4.9
2103	3	41.3	76.70	81.3	6.0	70.8	-7.6
2103	4	50.5	104.30	101.5	-2.6	99.2	-4.9
1107	3	44.6	84.10	88.4	5.1	81.3	-3.3
1107	3	44.6	81.60	88.4	8.3	81.3	-0.3
1107	4	59.3	103.80	122.2	17.7	124.0	19.4
1107	4	52.8	100.10	106.8	6.7	105.9	5.7
6101	7	91.0	191.72	211.3	10.2	200.7	4.6
6101	7	91.0	218.16	211.3	-3.1	200.7	-8.0

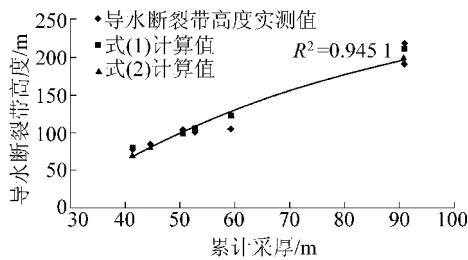


图6 导水断裂带高度实测与回归公式计算结果对比

Fig. 6 Height of water conducted zone test and regression formula calculation results

1) 发育高度与一般分层开采的覆岩破坏规律较符合,即随着采厚增大,破坏高度也相应增加。随分层数增加,覆岩破坏范围的最大高度一般会受到明显抑制,其裂高与累计采厚比一般会明显减小。

2) 由于工作面宽度较小,覆岩破坏最终发育形态呈明显的拱形,且偏于顶板一侧。

3) 由于覆岩层的垮落较煤体有一定的滞后性,垮落岩石不能及时充填采空区,因此覆岩的垮落角将随着开采分层数的增加而增大。

根据上述实测结果并结合覆岩破坏的具体特征,梅河矿区急倾斜水平分层综放开采覆岩破坏高度可按照以下方法预计。①开采第1分层时,导水断裂带高度可按照裂采比8倍选取;②当开采第2或者更多分层,累计采厚达到40 m以上时,可按照上述回归的预计公式进行预计,但优选式(2)。

## 5 结 论

1) 通过钻孔冲洗液漏失量观测,得到梅河矿区急倾斜特厚煤层水平分层综放开采裂采比为5.48~16.7,随着分层数增加,裂高与累计采厚比基本介于1.75~2.39。

2) 急倾斜特厚煤层水平分层综放开采覆岩破坏发育高度随着采厚增大,破坏高度也相应增加。但随着分层数的增加,裂高与累计采厚比一般会明显减小;最终发育形态呈明显的拱形,且偏于顶板一侧;覆岩的垮落角将随着开采分层数的增加而增大。

3) 梅河矿区急倾斜水平分层综放开采第1分层时覆岩破坏高度按照裂采比8倍选取;当开采第2或者更多分层,累计采厚达到40 m以上时,优选式(2)进行预计。

## 参考文献( References):

- [1] 张玉军,李英辉,殷志刚,等.梅河矿区砂砾含水层下残采综放工作面防溃泥突水技术及实践[J].煤矿开采,2013,18(5):76~79.  
Zhang Yujun, Li Yinghui, Yin Zhigang, et al. Technology of water - burst and mud collapse prevention and practice in full - mechanized caving residual - mining face under glutenite aquifer of Meihé Mining Area [J]. Coal Mining Technology 2013,18(5):76~79.
- [2] 石平五,高召宁.急斜特厚煤层开采围岩与覆盖层破坏规律[J].煤炭学报,2003,28(1):13~16.  
Shi Pingwu, Gao Zhaoning. Study on failure of surrounding rock and overlying bed in steep and specially thick coal seam mining [J]. Journal of China Coal Society 2003,28(1):13~16.
- [3] 戴华阳,郭俊廷,易四海,等.急倾斜煤层水平分层综放开采岩层及地表移动规律[J].煤炭学报,2013,38(7):1109~1115.  
Dai Huayang, Guo Junting, Yi Sihai, et al. The mechanism of strata and surface movements induced by extra - thick steeply inclined coal seam applied horizontal slice mining [J]. Journal of China Coal Society 2013,38(7):1109~1115.
- [4] 杨建立,滕永海.综采放顶煤导水裂缝带发育规律分析[J].煤炭科学技术,2009,37(12):100~102.  
Yang Jianli, Teng Yonghai. Study on development law of water conducted fracture zone in top coal of fully mechanized top coal caving mining face [J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(12): 100~102.
- [5] 王树仁,王金安,冯锦艳.大倾角厚煤层综放采场应力与变形破坏特征的三维数值分析[J].中国矿业,2004,13(7):69~72.  
Wang Shuren, Wang Jin'an, Feng Jinyan. 3-D numerical simulation on stress and deformation failure of mechanized top - coal caving in steep seam [J]. China Mining Magazine, 2004, 13(7): 69~72.
- [6] 鞠文君,李前,魏东,等.急倾斜特厚煤层水平分层开采矿压特征[J].煤炭学报,2006,31(5):558~561.  
Ju Wenjun, Li Qian, Wei Dong, et al. Pressure character in caving steep - inclined and extremely thick coal seam with horizontally grouped top - coal drawing mining method [J]. Journal of China Coal Society 2006,31(5):558~561.
- [7] 鞠文君,李文洲.急倾斜特厚煤层水平分段开采老顶断裂力学模型[J].煤炭学报,2008,33(6):606~608.  
Ju Wenjun, Li Wenzhou. Fracture mechanical model of main roof a-long inclined for fully - mechanized top - coal caving in steep and extra - thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 606~608.
- [8] 王宁波,张农,崔峰,等.急倾斜特厚煤层综放工作面采场运移与巷道围岩破裂特征[J].煤炭学报,2008,33(11):1216~1219.  
Wang Ningbo, Zhang Nong, Cui Feng, et al. Characteristics of stope migration roadway surrounding rock fracture for fully - mechanized

- caving face in steeply dipping and extra - thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society 2008 ,33( 11) :1216 – 1219.
- [9] 高延法,洪益清,黎 灵.急倾斜厚煤层开采水煤体溃泄机理研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2009 ,26( 1) :15 – 19.  
Gao Yanfa ,Hong Yiqing ,Li Ling. Mechanism of water – coal mixture burst in exploiting steeply – inclined thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2009 ,26( 1) :15 – 19.
- [10] 门建光,王 硕,袁瑞甫,等. 倾斜煤层煤柱覆岩结构特征及应力分布规律研究 [J]. 煤炭科学技术 2014 ,42( 5) :21 – 24.  
Men Jianguang ,Wang shuo ,Yuan Ruifu ,et al. Study on overburden strata structure features and stress distribution law of coal pillar in inclined seam [J]. Coal Science and Technology 2014 ,42 ( 5) :21 – 24.
- [11] 来兴平,孙 欢,单鹏飞,等. 急斜特厚煤层水平分段综放开采覆层类椭球体结构分析 [J]. 采矿与安全工程学报 2014 ,31( 5) :716 – 720.  
Lai Xingping ,Sun Huan ,Shan Pengfei ,et al. Overlying strata ellipsoid – style structure of horizontal section top – coal caving in steeply inclined and extra thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2014 ,31( 5) :716 – 720.
- [12] 李永明,刘长友,黄炳香,等. 急倾斜煤层覆岩破断和裂隙演化的采厚效应 [J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版 2012 ,27 ( 3) :10 – 15.  
Li Yongming ,Liu Changyou ,Huang Bingxiang ,et al. Mining height effect of overlying strata breakage and water flowing fracture evolution in steep seam [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology 2012 ,27( 3) :10 – 15.
- [13] 李永明,刘长友,李西蒙,等. 水体下急倾斜煤层采空区矸石充填顶板控制 [J]. 煤炭学报 2014 ,35( 9) :1419 – 1423.  
Li Yongming ,Liu Changyou ,Li Ximeng ,et al. Roof control effect for gangue backfilling of goaf in thin steeply inclined seam under water body [J]. Journal of China Coal Society ,2014 ,35 ( 9) :1419 – 1423.
- [14] 郭秉超,漆 涛,王宁波,等. 急倾斜特厚煤层综放开采工作面水患防治 [J]. 西安科技大学学报 2010 ,30( 2) :136 – 140.  
Guo Bingchao ,Qi Tao ,Wang Ningbo ,et al. Water prevention of full – mechanized top coal caving workings of heavy steep and thick seam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology 2010 ,30( 2) :136 – 140.
- [15] 张新荣,张玉军. 急倾斜特厚煤层综放面溃泥成因探测及数值模拟分析 [J]. 煤矿开采 2008 ,13( 2) :15 – 18.  
Zhang Xinrong ,Zhang Yujun. Cause analysis and numerical simulation of mud burst of full mechanized caving mining face in steeply inclined and extremely thick coal seam [J]. Coal Mining Technology 2008 ,13( 2) :15 – 18.
- [16] 张玉军,张华兴,陈佩佩. 覆岩及采动岩体裂隙场分布特征的可视化探测 [J]. 煤炭学报 2008 ,33( 11) :1216 – 1219.  
Zhang Yujun ,Zhang Huaxing ,Chen Peipei. Visual exploration of fissure field of overburden and rock [J]. Journal of China Coal Society 2008 ,33( 11) :1216 – 1219.
- [17] 康永华. 采煤方法变革对导水裂隙带发育规律的影响 [J]. 煤炭学报,1998 ,23( 3) :262 – 266.  
Kang Yonghua. The effect of various mining methods on development law of water flowing fractured zone [J]. Journal of China Coal Society ,1998 ,23( 3) :262 – 266.