

急倾斜特厚煤层基本顶破断规律研究

侯德建¹, 孙雪亮¹, 闫瑞兵¹, 张建鹏¹, 任鸽鹏²

(1. 神华新疆能源有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830027; 2. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:为研究急倾斜特厚煤层综放工作面顶板的破断规律,以乌东煤矿北采区 45° 倾角煤层为研究对象,根据简支梁理论建立了急倾斜特厚煤层综放开采条件下顶板的受力模型,得到顶板的力矩方程,分析基本顶破断位置,对破断后的基本顶基于悬臂梁理论建立力学模型,得到顶板的拉应力方程,分析不同回采环境下基本顶破断长度,同时采用 3DEC 软件对不同回采环境下顶板破断长度进行数值计算。结果表明:急倾斜特厚煤层综放开采在充分采动条件下顶板中部最先破断;随着基本顶厚度的增加,基本顶的破断长度呈线性减小;随着回采段高的增加,基本顶的破断比呈抛物线增加。现场采用钻孔窥视,获得基本顶的破坏情况,监测结果和理论分析基本一致,为后续的顶板“注水-爆破”耦合钻孔位置提供科学依据,对于煤矿的顶板灾害防治有重要意义。

关键词:水平分段综放开采;简支梁;悬臂梁;顶板破断规律

中图分类号:TD325 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)09-0116-06

Research on roof breaking laws of steep and ultra thick coal seam

HOU Dejian¹, SUN Xueliang¹, YAN Ruibing¹, ZHANG Jianpeng¹, REN Gepeng²

(1. Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830027, China; 2. School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study on the roof breaking law of fully-mechanized top coal caving face in steep and ultra thick coal seam. Taking the 45° coal seam in the northern mining area of Wudong Coal Mine as the research object. In this paper, the stress model of the roof under fully-mechanized top coal caving face in the steep and ultra thick seam was established, the moment equation of the roof was obtained, the basic top breaking position was analyzed, and then the basic roof was established based on the theory of cantilever beam. Stress equation was used to analyze the basic breaking length in different mining environments. At the same time, 3DEC software was used to calculate the breaking length of roof under different mining conditions. The results showed that the fully-mechanized top coal caving in the steep and ultra thick seam had the first break in the middle. With the increases of the basic roof thickness, the breaking length of the basic roof decreased linearly. With the increase of the height of the mining section, The breaking ratio was increased by parabola. The using of drilling on the scene peep, accessed to the basic top of the damage, monitoring results and theoretical analysis were same, for the roof monitoring and protection of coal was important.

Key words: horizontal segmented fully-mechanized top coal caving; simple beam; cantilever beam; roof breaking law

0 引 言

在急倾斜特厚煤层开采中,基本顶及其上覆岩层运移结构^[1-3]和基本顶破断位置^[4]及其破断长度大小对矿井安全生产起到至关重要的作用,同时由

于煤层赋存角度大,回采段高大,易使上覆岩层形成拱形结构^[5],对下分段的长度安全回采形成巨大隐患。鞠文君等^[6]通过对基本顶建立悬臂梁力学模型,得出悬臂梁所集聚的能量与其载荷的 2 次方成正比,与其长度的 5 次方成正比,提出了爆破断顶矿

收稿日期:2017-04-12;责任编辑:杨正凯 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.09.019

基金项目:新疆维吾尔自治区科技计划资助项目(201432102)

作者简介:侯德建(1975—),男,新疆昌吉人,高级工程师。通讯作者:闫瑞兵,助理工程师, Tel:17709917519, E-mail:543575653@qq.com

引用格式:侯德建,孙雪亮,闫瑞兵,等.急倾斜特厚煤层基本顶破断规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):116-121,145.

HOU Dejian, SUN Xueliang, YAN Ruibing, et al. Research on roof breaking laws of steep and ultra thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 116-121, 145.

压防治方案,并在现场成功应用。屠洪盛等^[7]等基于薄板理论研究急倾斜工作面顶板的初次破断特征,最终得出顶板呈现“U”字型破断,自下而上扩展,与实际顶板受力变形符合。王金安等^[8]基于弹性力学理论,提出了大倾角煤层基本顶的初次破断“V-Y”型断裂模式,基本顶初次断裂的空间顺序为“中上部、中下部、上部、下部”。

因此,对于基本顶最易破坏点及其破断大小的确定具有重要意义。然而对于急倾斜煤层顶板的破坏,由于影响因素多,顶板垮落和矿压显现特征都较难预测^[9-11],对于顶板的破断,学者们只提出其破坏的位置和破坏的形式,而对于急倾斜特厚煤层顶板的破断大小研究较少。笔者通过建立简支梁、悬臂梁力学模型分析并结合3DEC数值模拟,确定了急倾斜特厚煤层基本顶破断长度与基本顶厚度和回采段高的关系,并得出基本顶破断范围,有效预防急倾斜煤层顶板突然垮冒。

1 工程概况

乌东煤矿北采区45号煤层工作面地质构造简单,无大的断层和构造,煤层走向方位角 247° ,倾向方位角 157° ,倾角 $43^\circ\sim 45^\circ$,煤层结构简单,易破碎,煤层厚度变化较大,呈东厚西薄趋势,在东部水平厚度达56 m,向西部逐渐变薄,最薄处水平厚度34 m,基本顶与直接顶均为粉砂岩,泥钙质胶结,直接顶厚度3~5 m,层理节理发育,基本顶厚度10~20 m,厚度较大,强度高,节理、裂隙不太发育,具有整体性好和自稳能力强等特点。顶板的这种性质,易造成采空区大面积悬顶致灾的隐患。煤层底板主要为炭质泥岩。岩性特征:灰黑、灰褐色,薄层状,泥质胶结。工作面回采水平+575 m,地表标高+800—+830 m,地表起伏较大,工作面埋深255 m。

2 顶板力学模型分析

2.1 基本顶简支梁模型确定破断位置

急倾斜特厚煤层充分回采后,工作面上部煤岩体存在较大的运移空间,上水平采空区煤岩体受到自身重力和基本顶压力而垮落,最终在回采阶段煤层内释放,基本顶形成如图1a所示的受力模型。在小变形的前提下,将顶板岩层可视为简支梁^[14],将顶板底端视为固支,顶板和上水平矸石连接处视为简支,顶板压力来自构造应力 σ_h 和自重应力 σ_v 两方面的力,考虑自重应力、构造应力随深度的变化,顶

板岩体受力情况如图1b所示,图中箭头顶板岩层的受力大小和方向,急倾斜煤层在开采过程中,由于倾角大,未放出的顶煤和矸石在重力作用下自溜充填顶板下部,并使采空区上部出现较大悬顶,因此对采空区煤岩体做如下处理:整个基本顶长度为 L ,下部完全垮落压实区 L_1 处为均布载荷 q_2 ,非完全压实区 L_2 处为三角载荷, x 轴方向表示顶板倾向方向, y 轴表示顶板的法向方向,坐标原点为顶板和上分段煤岩体结合点。

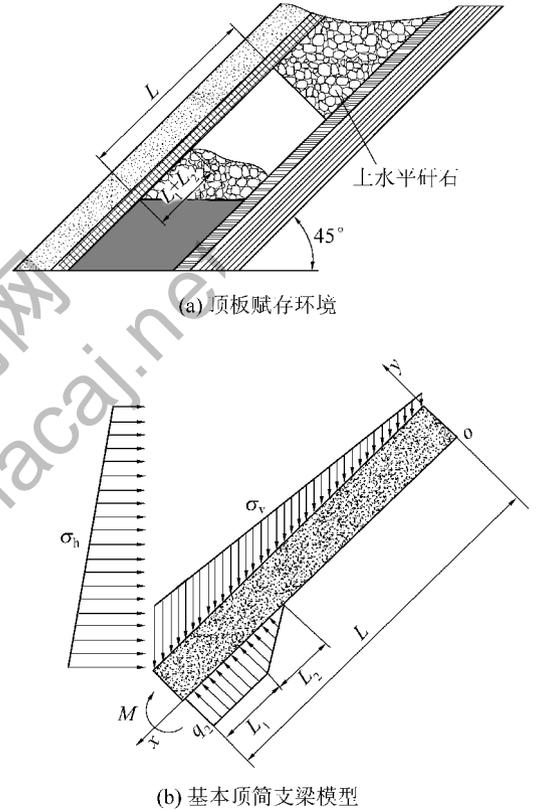


图1 急倾斜特厚煤层顶板垮落模型

Fig. 1 Roof breaking model of steep and ultra coal seam

设岩梁沿走向方向的宽度为单位长度,岩梁在自重应力的作用下,岩梁开裂的条件是其弯矩超过拉应力极限值 $[\sigma_1]$,即:

$$\sigma_0 = \frac{M}{W} = [\sigma_1] \quad (1)$$

式中: σ_0 为原点的实际拉应力; M 为原点的弯矩; W 为岩梁的截面模量。

考虑自重时基本顶任意截面处上覆岩层载荷为

$$q(x) = -\frac{1}{2}\gamma(x\sin 2\alpha + 2h\cos \alpha) - \mu\gamma(x\sin^2 \alpha + h\sin \alpha) - m\gamma\cos \alpha \quad (2)$$

式中: γ 为上覆岩体平均体积力, kN/m^3 ; h 为基本顶

顶端埋深, m ; α 为煤层倾角, ($^\circ$); μ 为泊松比; m 为基本顶厚度, m 。

乌东煤矿北采区采用全部垮落法处理顶板, 冒落的矸石自行充填采空区, 可利用如下公式估算矸石充填长度为

$$L_1 + L_2 = \frac{K'_p \sum h_1}{\sum h_1 + M_1} L \quad (3)$$

式中: K'_p 为矸石的平均残余碎胀系数, 取 $1.1^{[15]}$; M_1 为开采厚度, m ; $\sum h_1$ 为伪顶与直接顶厚度, m ; 在此取 $L_1 = L_2$ 。

非完全压实区简化支撑力为

$$F_3 = \int_{L-L_1-L_2}^{L-L_1} q_2(x) dx \quad (4)$$

作用于 $x = L - L_1 - L_2/3$ 处。其中 q_2 的最大值取决于矸石的压实程度, 这里取 $0.2\gamma h$ 。

根据材料力学中载荷与弯矩的关系可得当 $0 < x < L - L_1 - L_2$ 时, 基本顶弯矩为

$$M(x) = \frac{h\gamma(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) + m\gamma}{2}(Lx - x^2) + \left(\frac{1}{12}\gamma\sin 2\alpha + \frac{1}{6}\mu\gamma\sin^2\alpha\right)(L^2x - x^3) - \frac{q_2L_1^2}{2L}x - \frac{q_2L_2(3L_1 + L_2)}{6L}x \quad (5)$$

当 $L - L_1 - L_2 < x < L - L_2$ 时, 基本顶弯矩为

$$M(x) = \frac{h\gamma(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) + m\gamma}{2}(Lx - x^2) + \left(\frac{1}{12}\gamma\sin 2\alpha + \frac{1}{6}\mu\gamma\sin^2\alpha\right)(L^2x - x^3) - \frac{q_2L_1^2}{2L}x + \frac{q_2(x - L + L_1 + L_2)^3}{6L_2} - \frac{q_2L_2(3L_1 + L_2)}{6L}x \quad (6)$$

当 $L - L_2 < x < L$ 时, 基本顶弯矩为

$$M(x) = \frac{h\gamma(\cos\alpha + \mu\sin\alpha) + m\gamma}{2}(Lx - x^2) + \left(\frac{1}{12}\gamma\sin 2\alpha + \frac{1}{6}\mu\gamma\sin^2\alpha\right)(L^2x - x^3) + \frac{1}{2}q_2(x - L + L_1)^2 - \frac{q_2L_1^2}{2L}x + \frac{q_2L_2(3L_1 + L_2 - 3L)}{6L}(L - x) \quad (7)$$

由此可确定的各项参数为: $M_1 = 35$ m, $h = 230$ m, $\sum h_1 = 4$ m, $\gamma = 2.5$ kN/m³, $h_2 = 25$ m, $\alpha = 45^\circ$, $K'_p = 1.1$, $L = 70$ m, $\mu = 0.288$ 。

通过计算得出急倾斜特厚煤层基本顶最大弯矩

点位于工作面中部附近, 并且因为煤层开采厚度、回采段高较大, 直接顶破断的矸石量小, 对基本顶的变形破坏影响很小。

2.2 基本顶悬臂梁模型

急倾斜特厚煤层在充分开采的前提下, 通过对顶板建立简支梁模型分析得出基本顶中部最先发生拉破坏, 破断后的基本顶分为上下部分如图 2 所示(不考虑岩层的挠曲、岩层的水平力和基本顶上下两部分的相互作用), 上部基本顶受上覆岩层和采空区煤岩体共同作用, 下部基本顶受上覆岩层和煤层共同作用, 可将上下部分基本顶视为悬臂梁模型。

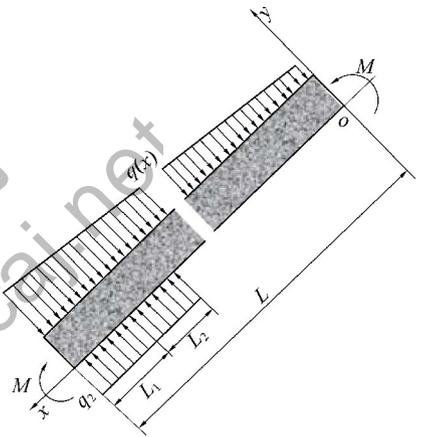


图2 基本顶悬臂梁模型

Fig.2 Main roof cantilever beam model

由于直接顶破坏形成的破碎煤岩体对顶板支护的范围很小, 可视为压实支撑。由岩体力学极限强度理论可知, $R_m < \sigma_c < \sigma_{bc}$, 即岩石的抗拉强度小于抗剪强度小于抗压强度。并通过式(1)和式(2)计算可得:

在 $0 < x < L/2$ 时, 则有:

$$\sigma(x) = - \left[\frac{3\gamma(x\sin\alpha + h)(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{m^2} + \frac{3\gamma}{m}\cos\alpha \right] x^2 \quad (8)$$

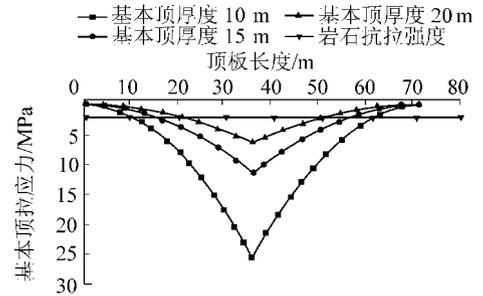
在 $L/2 < x < L - 2L_2$ 时, 则有:

$$\sigma(x) = - \left[\frac{3\gamma(x\sin\alpha + h)(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{m^2} + \frac{3\gamma}{m}\cos\alpha \right] (x - L)^2 \quad (9)$$

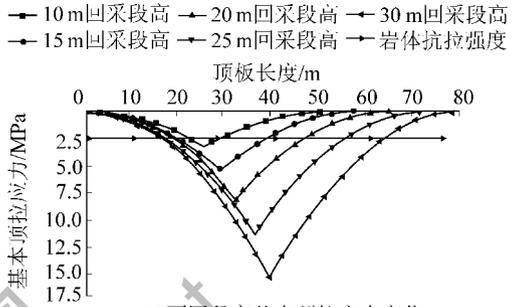
在 $L - 2L_2 < x < L$ 时, 有:

$$\sigma(x) = - \left[\frac{3\gamma(x\sin\alpha + h)(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{m^2} + \frac{3\gamma}{m}\cos\alpha \right] (x-L)^2 + \frac{1.2h\gamma}{m^2}(x-L+2l_1) \quad (10)$$

依据岩体力学极限强度理论可知,即岩石的抗拉强度小于抗剪强度和抗压强度。由式(8)——(10)计算得出基本顶拉应力变化如图3所示。由图3a中不同基本顶厚度拉应力的大小,根据岩石的拉应力强度准则得出基本顶的破断长度见表1,在基本顶厚度为10 m时,基本顶最大拉应力为27 MPa,同时随着基本顶厚度的增加,基本顶厚度为10~15 m时,拉应力急剧减小;图3b中不同回采段高基本顶拉应力的大小,根据岩石的拉应力强度准则得出基本顶破断长度,随着回采段高不断增加,基本顶拉应力、破断长度也在逐渐增加,回采段高30 m时,基本顶所受到的拉应力达到17 MPa。



(a)不同基本顶厚度拉应力变化



(b)不同段高基本顶拉应力变化

图3 不同环境下基本顶拉应力变化

Fig. 3 Main roof tensile stress under the different environment

表1 基本顶理论破断长度

Table 1 Theory of main roof breaking length

基本顶参数	基本顶厚度/m			回采段高度/m				
	10	15	20	10	15	20	25	30
基本顶裸露长度/m	70.71	70.71	70.71	49.5	56.57	63.64	70.71	77.78
基本顶破断长度/m	49.5	39.0	29.0	7.0	20.0	29.0	39.0	47.0

3 数值模拟分析

3.1 模型参数确定

依据乌东煤矿北采区+575 m水平工作面开采布置,建立了3DEC数值计算模型,模型水平方向为工作面布置方向,垂直方向为工作面埋深。假定工作面放煤充分,同时上水平矸石强度低,受到顶板压力先被破坏,因此模拟回采时,+575 m水平顶煤与只受顶板压力和自身重力的上水平矸石同时采出,模型如图4所示。模型中煤层水平厚度为50 m、直接顶厚度为4 m、基本顶厚度为15 m,模型顶部自由,其余部分采取固支,限制其变形。模型上部设置10 m的边界以防止上部力对模型破坏产生影响,然后进行模型计算,直至模型平衡并使垮落块体完全接触底煤。

通过3DEC数值模拟对乌东煤矿北采区+575 m水平工作面在基本顶厚度为10、15、20 m和回采段高为10、15、20、25、30 m两种赋存环境进行模拟。

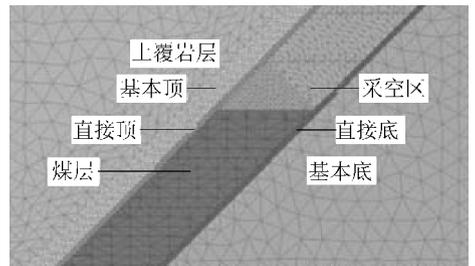


图4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

模型主要力学参数见表2。

3.2 模型结果分析

通过3DEC模拟了不同环境下基本顶的破断长度,见表3。借助3DEC模拟工作面回采段高为25 m,基本顶板厚度为10 m时破断长度为51 m,并引起基本顶上部岩层的破坏,其破坏高度为5 m,同时上覆岩层出现离层;基本顶为15 m厚时破断长度为40 m,上覆岩层出现离层但未出现垮落;基本顶为20 m厚时破断长度减小至29.7 m,上覆岩体未垮落

也未出现离层。基本顶上端为破断长度随着基本顶厚度的增加而增加。

表2 煤岩物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of coal and rock

名称	岩性	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	抗拉 强度/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)
基本顶	粉砂岩	13.000	0.230	3.70	30.33	2.30	2 483
直接顶	粉砂岩	13.000	0.280	3.70	30.33	2.30	2 483
煤层	煤	0.848	0.283	2.95	25.90	1.20	1 260
直接底	炭质泥岩	12.000	0.280	3.63	26.70	1.46	2 008
基本底	粉砂岩	13.000	0.230	3.70	30.33	2.30	2 483

表3 基本顶破断长度

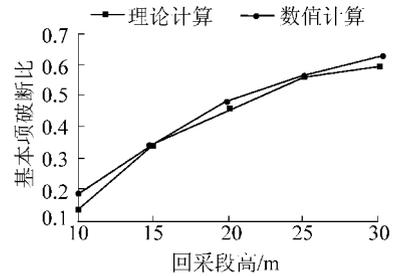
Table 3 Main roof fracture length

参数	基本顶厚度/m			回采段高度/m				
	10	15	20	10	15	20	25	30
基本顶裸露长度/m	70.71	70.71	70.71	49.50	56.57	63.64	70.71	77.78
基本顶破断长度/m	51.00	40.00	29.70	9.00	19.50	30.50	40.00	48.40

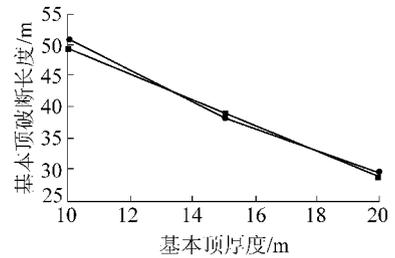
借助3DEC模拟基本顶厚度为15 m,工作面回采段高10 m时基本顶破断长度为9 m,基本顶悬空长度达40 m;工作面回采段高15 m时破断长度为19.5 m,基本顶悬空达36 m;工作面回采段高20 m时破断长度为30.5 m,基本顶悬空达33.14 m;工作面回采段高25 m时破断长度为40 m,基本顶悬空达30.71 m;工作面回采段高30 m时破断长度为48.4 m,基本顶悬空达29.38 m。由上述分析得出基本顶厚度变化和工作面回采段高变化时基本顶的破断长度,随着回采段高的增加,虽然基本顶的悬顶长度逐渐减小但仍然有将近30 m的悬顶,对下水平的安全回采造成严重影响。

4 理论计算及数值模拟结果分析

通过理论计算和数值模拟得出表2和表3数据,并对表中数据进行分析,得到基本顶厚度变化和工作面回采段高变化基本顶的破断参数如图5所示。图5a为乌东北采区在基本顶厚度不变的情况下,由理论计算和3DEC数值模拟确定,随着回采段高的增加,基本顶的破断长度和裸露长度之比呈抛物线形式增加,且变化速率逐渐减小。图5b为乌东北采区工作面在回采段高为25 m时,随着基本顶厚度的增加,基本顶的破断长度呈线性减小;基本顶厚



(a)不同回采段高基本顶破断比



(b)基本顶厚度不同时的破断长度

图5 不同条件下基本顶破断情况

Fig. 5 Main roof breakage under the different condition

度每增加5 m,基本顶的破断长度减小10 m,当基本顶厚度为20 m时,基本顶破断长度为30 m,悬顶长度近40 m,对下一个回采阶段造成严重影响。

5 现场工业性试验

钻孔窥视仪用于任意方向煤、岩体松动及裂隙窥视、水文探孔、瓦斯抽采孔孔内情况探查、锚杆孔质量检查和裂隙观察等。现场采用YS(B)钻孔窥视仪采用高清晰度探头及彩色显示设备,可分辨1 mm的裂隙及不同岩性,与微机可直接连接,便于图像的实时显示,最终提供更加直观的数据参数。钻孔窥视布置位置如图6所示,窥视孔长度52 m,沿煤层倾向方向钻孔夹角为74°,沿煤层走向钻孔角度为63°,孔间距10 m,共打5个孔。

选取其中具有代表性的钻孔进行分析,如图7所示,图7a中0~2 m范围内煤岩体较为破碎,该区域处于巷道的松动圈范围之内;图7b中2~4 m范围围岩裂隙发育,但孔壁相对光滑,未出现掉渣等现象;图7c中4~6 m范围内孔壁光滑,围岩裂隙明显减少;图7d中6~30 m范围内孔壁相对完整,局部存在环向或纵向裂隙,围岩稳定性较好;图7e中在30~45 m范围内,孔壁粗糙,裂隙发育明显,局部存在孔壁剥落;图7f中45~52 m范围内,孔壁粗糙,纵、横向及环向裂隙交错发育,存在较大的环向破坏。

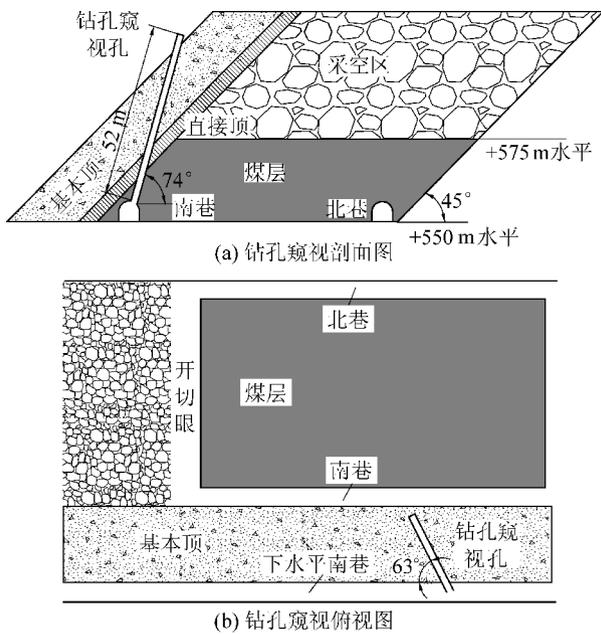


图6 钻孔窥视布置

Fig. 6 Drilling spy on arrangement diagram

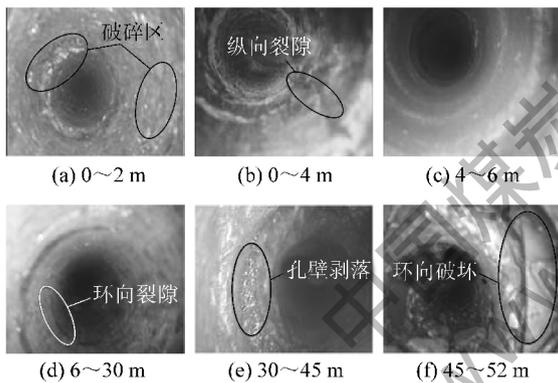


图7 顶板钻孔窥视

Fig. 7 Result of roof borehole observation

根据钻孔的长度和角度分析可得:钻孔沿着基本顶破断的位置进行窥视,钻孔孔壁粗糙,裂隙发育,在45 m附近孔壁破碎严重,推测此区域基本顶发生破断,计算得出破断点距基本顶底端15 m与理论值13.6 m基本一致。

6 结 论

1) 急倾斜特厚煤层开采时,煤层开采厚度大,回采段高大,基本顶运移空间大,直接顶和上部采空区滑落的矸石对基本顶的支撑影响小,使基本顶最先破坏点位于工作面中间。

2) 当煤层倾角、段高一定时,顶板的破坏范围随着顶板厚度的增加呈线性减小。

3) 当顶板厚度、煤层倾角一定时,顶板的破坏

范围随着段高的增加,基本顶的破断长度与基本顶的裸露长度的比值呈抛物线增加。

参考文献 (References):

- [1] 伍永平,解盘石,王红伟,等.大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构[J].煤炭学报,2010,35(8):1252-1256.
WU Yongping, XIE Panshi, WANG Hongwei, et al. Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1252-1256.
- [2] 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,2013,38(8):1312-1318.
WANG Ningbo, ZHANG Nong, CUI Feng, et al. Characteristics of stope migration and roadway surrounding rock fracture for fully-mechanized top-coal caving face in steeply dipping and extra-thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1312-1318.
- [3] 戴华阳,易四海,鞠文君,等.急倾斜煤层水平分层综放开采岩层移动规律[J].北京科技大学学报,2006,28(5):409-412,467.
DAI Huayang, YI Sihai, JU Wenjun, et al. Law of strata and surface movement due to horizontally sliced mechanized top caving mining at steep-inclined super-thick coal seam [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(5): 409-412, 467.
- [4] 来兴平,李云鹏,王宁波,等.基于梁结构的急斜煤层综放工作面顶板变形特征[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):871-876.
LAI Xingping, LI Yunpeng, WANG Ningbo, et al. Roof deformation characteristics with full-mechanized caving face based on beam structure in extremely inclined coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 871-876.
- [5] 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 Zhaoqing. The failure laws of surrounding rocks and overlying bed in the steep special thickness seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(1): 13-16.
- [6] 鞠文君,李文洲.急倾斜特厚煤层水平分段开采基本顶断裂力学模型[J].煤炭学报,2008,33(6):606-608.
JU Wenjun, LI Wenzhou. Fracture mechanical model of main roof of 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.
- [7] 屠洪盛,屠世浩,陈芳,等.基于薄板理论的急倾斜工作面顶板初次变形破断特征研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(1):49-54,59.
TU Hongsheng, TU Shihao, CHEN Fang, et al. Study on the deformation and fracture feature of steep inclined coal seam roof based on the theory of thin plates [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014,

(下转第145页)

- ment research on pump-control-motor speed governing system with inverter[J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(1): 109-114.
- [15] 赵静一, 王智勇, 覃艳明, 等. TLC900 型运梁车液压驱动系统与发动机功率匹配研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(7): 878-881.
- ZHAO Jingyi, WANG Zhiyong, QIN Yanming, *et al.* Research on hydraulic driving system and engine power match in TLC900 transporting girder vehicle [J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 18(7): 878-881.
- [16] 雷 焯. 矿用静液压传动特种车辆防爆智能电控系统研究[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(6): 91-96.
- LEI Huang. Study on explosion-proof intelligent electric control system of mine special vehicle with hydrostatic driving[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(6): 91-96.
- [17] 赵静一, 王智勇, 覃艳明, 等. TLC900 型运梁车电液转向控制系统的仿真与试验分析[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(9): 65-68.
- ZHAO Jingyi, WANG Zhiyong, QIN Yanming, *et al.* Simulation and experimental analysis electro-hydraulic steering control system for TLC900 transporting girder vehicle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(9): 65-68.
- [18] 姜 勇. 基于 AMESim 的复合轮式海底车液压驱动系统建模与仿真[J]. *机床与液压*, 2012, 40(13): 140-142.
- JIANG Yong. Modeling and simulation of composite wheeled submarine vehicle's hydraulic driving system based on AMESim [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(13): 140-142.
- [19] 高钦和, 王孙安. 面向原理图的液压系统自动建模与仿真技术研究[J]. *机床与液压*, 2006(12): 202-204.
- GAO Qinhe, WANG Sunan. Study on computer automatic modeling and simulation of hydraulic system [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2006(12): 202-204.
- [20] 李宜达. 控制系统设计与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- the rule of stope roof movement and strata behavior in large inclined coal seam [J]. *Safety in coal mines*, 2010, 41(6): 6-9.
- [11] 邵小平, 石平五. 急斜煤层大段高工作面矿压显现规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2009, 26(1): 36-40.
- SHAO Xiaoping, SHI Pingwu. Strata behavior in large section face of steep seams [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2009, 26(1): 36-40.
- [12] 邢 望, 张艳伟. 急倾斜工作面顶板变形特征及其影响因素分析[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(1): 189-192.
- XING Wang, ZHANG Yanwei. Analysis of the deformation characteristics and the influential factors for the roof in steeply inclined face [J]. *Safety in Coal Mines*, 2013, 44(1): 189-192.
- [13] 廖协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(4): 379-382.
- MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(4): 379-382.

(上接第 121 页)

31(1): 49-54, 59.

- [8] 王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)-初次破断[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(6): 1353-1360.

WANG Jinan, ZHANG Jiwei, GAO Xiaoming, *et al.* Fracture mode and evolution of main roof stratum above longwall fully mechanized top coal caving in steeply inclined thick coal seam(I)-initial fracture [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(6): 1353-1360.

- [9] 赵元放, 张向阳, 涂 敏. 大倾角煤层开采顶板垮落特征及矿压显现规律[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(2): 231-234.

ZHAO Yuanfang, ZHAO Xiangyang, TU Min. Roof caving characteristic and strata behavior in exploiting steep coal seams [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(2): 231-234.

- [10] 武景云, 黄万朋, 马鹏鹏, 等. 大倾角煤层采场顶板运动与矿压显现规律研究[J]. *煤矿安全*, 2010, 41(6): 6-9.

WU Jingyun, HUANG Wanpeng, MA Pengpeng, *et al.* Study on