



移动扫码阅读

王寅,付兴玉,孔令海,等.近距离煤层群上行式开采悬空结构稳定性研究[J].煤炭科学技术,2020,48(12):95-100. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.011  
WANG Yin,FU Xingyu,KONG Lingbo,*et al.*Study on stability of dangling structure in ascending mining contiguous coal seams[J].Coal Science and Technology,2020,48(12):95-100. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.12.011

# 近距离煤层群上行式开采悬空结构稳定性研究

王寅<sup>1,2,3</sup>,付兴玉<sup>2,3</sup>,孔令海<sup>2,3</sup>,赵阳<sup>2,3</sup>,张宁博<sup>2,3</sup>

(1.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;2.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;  
3.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:**为解决上行式开采工作面推进至下部煤层采空区开切眼附近的底板下沉风险问题,选取新疆龟兹矿业西井 A6-103 典型上行式开采工作面,采用理论分析和相似模拟方法,通过研究上行式开采重复采动下顶底板结构形态,得到覆岩破断机制,并提出了“上行式开采三铰拱式结构”。结果表明:近距离煤层群上行式开采工作面通过下部煤层采空区开切眼上方前会逐渐形成特殊块体结构,该结构以下部煤层开采而产生的预定裂隙位置为中间铰接点,且只能靠层间岩层关键层形成的悬空结构提供支撑才能保持稳定,并得到了该模型稳定条件判据及计算方程。另通过相似模拟结果,证明了该结构在上述条件回采过程中无法保持稳定,下部煤层采空区开切眼边界处的悬空结构会发生二次失稳,使得上行式开采工作面顶底板突然垮断。最后提出了针对性的防治措施,保证了工作面的安全回采。

**关键词:**近距离煤层群;上行式开采;关键层;悬空结构;三铰拱式结构

**中图分类号:**TD323 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2020)12-0095-06

## Study on stability of dangling structure in ascending mining contiguous coal seams

WANG Yin<sup>1,2,3</sup>,FU Xingyu<sup>2,3</sup>,KONG Linghai<sup>2,3</sup>,ZHAO Yang<sup>2,3</sup>,ZHANG Ningbo<sup>2,3</sup>

(1.School of Energy and Mining Engineering,China University of Mining and Technology-Beijing 100083,China;2.China Coal Research Institute, Beijing 100013,China;3.State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization,Beijing 100013,China)

**Abstract:**In order to solve the problem of floor subsidence risk when the ascending mining face is pushed into the goaf ope-off cut hole of the lower coal seam,a typical ascending mining face A6-103 in the west well of Guici Mine in Xinjiang Uygur Autonomous Region was selected,and the overburden fracture mechanism was obtained by studying the structure form of the lower roof and floor of the ascending mining with Repeated mining by theoretical analysis and similarity simulation method,and the ascending mining with three-hinged arch structure was proposed.The results show that a special block structure is gradually formed in the up-mining working face of the close coal seam group through the upper cutting hole of the goaf in the lower coal seam,and the predetermined fracture position generated by the mining of the coal seam below the structure is the intermediate hinge point.The structure can only maintain stability by relying on the support of the dangling structure formed by the key stratum in the inter-layer strata,and the stability criterion and calculation equation of the model are obtained.Through similar simulation results,it is proved that the structure cannot maintain stability in the process of stoping under the above conditions,and the suspended structure at the goaf cut boundary of the lower coal seam will suffer secondary instability,resulting in the sudden collapse of the roof and floor of the upstream mining face.At the same time,the corresponding prevention and control measures are put forward to ensure the safety of mining.

**Key words:**contiguous coal seams;ascending mining;key stratum;dangling structure;three-hinged arch structure

收稿日期:2020-04-20;责任编辑:郭鑫

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金资助项目(51874176);天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2019-TD-QN018)

作者简介:王寅(1989—),男,山东兖州人,助理研究员,硕士。E-mail:495981609@qq.com

0 引 言

中国西部煤田普遍具有埋藏深度浅、围岩较坚硬、煤层分布密集的特点<sup>[1-2]</sup>。以往地质勘探不够精细,后续开采过程中会出现上覆岩层仍可采煤层资源现象。而原有的采掘布置并未考虑上覆煤层资源的开采。如何在采空区上覆安全开采,合理回收更多资源,是许多矿井面临的问题。由于开采条件不同,各矿井进行了许多针对性的上行式开采研究及试验工作,获得了丰富的实践经验和理论基础<sup>[3-7]</sup>。随着工作面的逐步回采,由于顶板较坚硬,岩层强度较大,层间岩层关键层发生初次破断后,将在采空区开切眼上方将形成较长的悬空块体,与其下方存在的未压实区组成悬空结构<sup>[8-9]</sup>。悬空结构的存在保证了上部煤层的连续性,但也为后期二次采动造成重大安全隐患。上行式开采工作面推进至该区域上方时,受到二次扰动的影响,超前支承压力和下部煤层采空区开切眼边缘的支承压力叠加作用在悬空结构上,形成应力集中,很可能引起该结构的二次失稳,容易发生工作面突然下沉事故,从而对上行式开采工作面安全开采造成严重威胁<sup>[10]</sup>。许家林等<sup>[11-13]</sup>认为,重复采动期间,覆岩关键层破断结构会因其上覆载荷过大而滑落失稳,易导致强矿压的发生。而对于上行式开采,单纯考虑应力集中导致顶板结构的失稳,无法全面揭示多煤层整体覆岩结构变化及上行式开采工作面矿压显现规律。为了对该类工况进一步深入分析,以全面掌握下部煤层采空区开切眼处强矿压致灾机制,以新疆龟兹矿业西井 A6-103 上行式开采工作面为工程背景,利用现场实测、理论分析、相似模拟等手段,从围岩受二次采动结构形态及力学模型分析的角度开展相关研究,最终揭示上行式开采覆岩破断机理及特征,研究成果将对西部矿区上行式开采现场安全保障具有重要意义,同时也为后续对多次采动覆岩结构变化规律的进一步研究提供支持。

1 工程背景

1.1 龟兹矿业西井概况

新疆龟兹矿业有限公司西井是河南能源新疆公司的主力矿井之一,设计生产能力为 90 万 t/a。可采煤层共 5 层,其中 A6 煤层与上覆 A6-1 煤层属于近距离煤层群,且顶板及层间岩层均为较坚硬的砂岩层。由于实际开采条件和勘探不详实等历史原因,龟兹矿业西井针对 A6-1 煤层和 A6 煤层采取了

上行式开采的方法。开展相关研究之前,矿井在 A6 煤层中已开采了 A601 工作面、A602 工作面和 A603 工作面西段,在 A6-1 煤层中已开采了 A6-101 上行式开采工作面、A6-102 上行式开采工作面,具体如图 1 所示。



图 1 开采布局平面  
Fig.1 Mining layout plan

上述 2 个 A6-1 煤层的上行式开采工作面均直接于 A6 煤层采空区上部开采,不涉及实体煤到采空区开切眼过渡段,未受悬空结构影响。项目选取 A6-103 工作面为接续待采工作面,其下部大部分区域为 A603 工作面采空区,且开切眼位置为实体煤区,则工作面回采过程中面临悬空结构的二次失稳,存在较大的安全风险。

1.2 煤岩赋存条件

为准确探明 A6 煤层和 A6-1 煤层顶底板岩层赋存情况,选择在未受采动影响的区域的 A6 煤层巷道中施工 2 个顶板取心钻孔,根据取心结果整理完成了 A6 煤层顶板柱状图。A6 煤层平均厚度 5.50 m, A6-1 煤层平均厚度 5.80 m,煤层平均间距为 19.09 m,如图 2 所示。同时对取芯得到的煤岩样进行了相关物理力学参数测定。

岩性	厚度/ m	累厚/ m	柱状	岩石特征及岩性描述
含砾粗砂岩	9.80	9.80		灰白色、灰色中厚层状含砾粗粒砂岩,砾石主要为灰白色石英团块及灰色砂岩岩屑
泥质粉砂岩	10.60	20.40		灰色、深灰色薄中厚层状泥质粉砂岩
细粒砂岩	4.29	24.69		灰色、中厚层状细粒砂岩,主要成分为石英和长石
泥质粉砂岩	4.42	29.11		灰色、深灰色薄~中厚层状泥质粉砂岩
煤	5.50	34.61		A6-1煤,黑色,污手,质轻,参差状断口
泥质粉砂岩	4.39	39.00		灰色、深灰色薄~中厚层状泥质粉砂岩
粗砾砂岩	8.60	47.60		灰白色、灰色中厚层状含砾粗粒砂岩,砾石主要为灰白色石英团块及灰色砂岩岩屑
泥质粉砂岩	6.10	53.70		灰色、深灰色薄~中厚层状泥质粉砂岩
煤	5.80	59.50		A6煤,灰色,块状,玻璃及沥青光泽,半亮煤

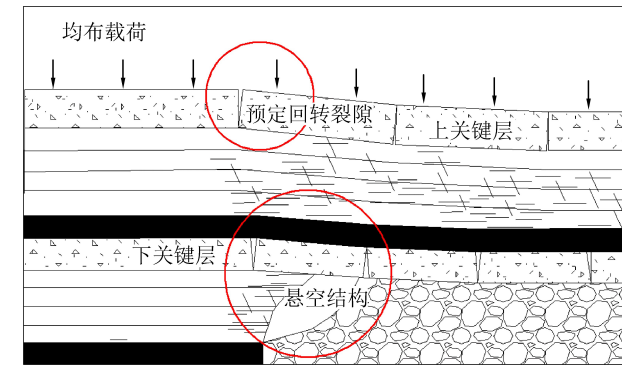
图 2 A6 煤层顶板综合柱状图  
Fig.2 Composite columnar section of A6 coal roof

由柱状图及物理力学参数测定结果分析可知, A6 煤层顶板关键层为厚 8.6 m 的含砾粗砂岩, A6-1 煤层顶板关键层为厚 10.6 m 的粉砂岩, 上述关键层的破断、运动将直接影响工作面的矿压显现<sup>[14-16]</sup>。

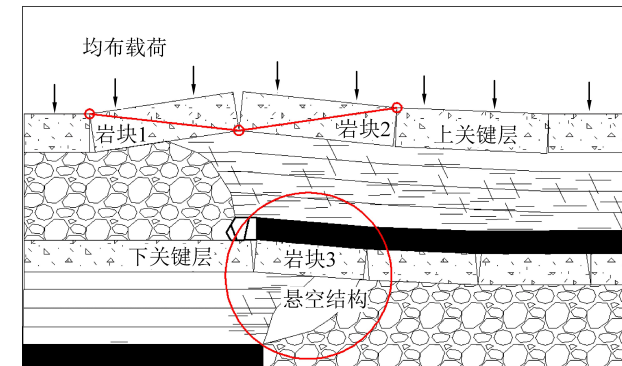
## 2 上行式开采覆岩破断机理分析

### 2.1 覆岩结构特征分析

随着上行式开采工作面逐渐向下部采空区边界推进, 煤层上方关键层将逐步发生周期性破断回转运动, 岩块之间相互铰接<sup>[17-18]</sup>。由于层间距较小, 下部煤层回采后导致上关键层顶板产生预定的回转及裂隙位置, 如图 3a 所示。后期受上覆煤层 2 次采动影响, 上关键层顶板会在下关键层产生的悬空结构上方, 形成如图 3b 所示, 由岩块 1 和岩块 2 组成的接近共线的三铰拱式结构。



(a) 下部煤层回采后顶板结构



(b) 上行开采工作面推进至下部分采空区开切眼处顶板结构

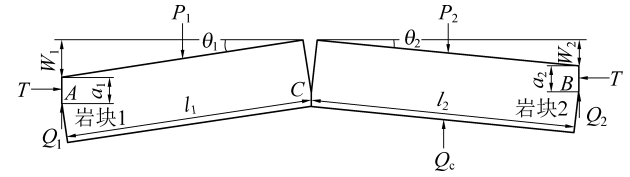
图 3 上行式开采工作面覆岩结构

Fig.3 Structure chart of overlying stratas of ascending mining face

### 2.2 覆岩结构稳定性分析

为了便于力学分析, 将图 3b 的结构进行适当简化, 建立力学模型, 如图 4 所示。此处认为两岩块所形成的三铰拱式结构铰接处为塑性铰, 故该结构为近瞬变几何非线性动态平衡结构。根据库兹涅佐夫的理论, 铰接岩块间的三铰结构必须满足中间铰接点高于两端铰接点时, 结构才能够保持稳定<sup>[19-20]</sup>。而悬空结构上方两块体形成的三铰拱式结构, 由于

下层煤开采后上关键层岩块 1 形成的预定回转, 以及上部煤层 2 次采动产生的上关键层岩块 2 的回转, 形成以下层煤开采产生的预定裂隙位置为中间铰接点的特殊块体结构。具体表现为中间铰接点低于两端铰接点的上行式开采三铰拱式结构。如需维持该结构的整体稳定, 只能依靠层间下关键层的悬空结构提供足够的支撑力。



$W_1, W_2$ —岩块 1、岩块 2 的下沉量, m;  $l_1, l_2$ —岩块 1、岩块 2 的长度, m;  $h$ —上关键层(岩块 1、岩块 2)厚度, m;  $a_1, a_2$ —岩块 1、岩块 2 两侧的接触面高度, m;  $\theta_1, \theta_2$ —岩块 1、岩块 2 的回转角, ( $^\circ$ );  $T$ —岩块 1、岩块 2 两侧所受挤压力, N;  $Q_1, Q_2$ —岩块 1、岩块 2 两侧所受

摩擦力, N;  $P_1, P_2$ —岩块 1、岩块 2 所受上方岩层压力, N;

$Q_c$ —岩块 2 所受下方岩层的支撑力, N

图 4 上行式开采三铰拱式结构力学模型

Fig.4 Three - hinged arch structure mechanics model for ascending mining

由“砌体梁”结构理论<sup>[16]</sup>可知, 岩块 1、岩块 2 两侧的接触面高度分别为  $a_1, a_2$ ,

$$a_1 = 0.5(h - l_1 \sin \theta_1)$$

$$a_2 = 0.5(h - l_2 \sin \theta_2) \quad (1)$$

由岩块之间为塑性铰接触关系, 则图 4 中水平力  $T$  作用点的位置可取  $a_1/2, a_2/2$  处。取  $Q_c$  的作用点为岩块 2 下部的中点处, 分别对 A、B 点取弯矩  $\Sigma M_A = 0, \Sigma M_B = 0$ , 对两岩块结构垂直方向外力取 0, 并将式(1)代入, 得:

$$Q_c = P_2 \frac{h - l_2 \sin \theta_2}{h - l_2 \sin \theta_1} P_1 + \frac{4h - 2l_2(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{h - l_2 \sin \theta_1} R_c \quad (2)$$

式中:  $R_c$  为结构 C 点处的剪切力, N。

由于 A6、A6-1 煤层厚度相似, 则上部 A6-1 煤层回采至图 3(b) 位置时, 岩块 1 与岩块 2 的回转下沉量  $W_1 \approx W_2$ , 可取岩块 1、岩块 2 的回转角  $\theta_1 = \theta_2$ , 上覆载荷  $P_1 = P_2$ , 则式(2)可简化为

$$Q_c = 4R_c \quad (3)$$

由“砌体梁”结构理论<sup>[16]</sup>可知, 随着上行式开采工作面继续向前推进, 岩块 1、岩块 2 的回转角  $\theta_1, \theta_2$  均减小, 故 C 点处的剪切力  $R_c$  逐渐增大。由式(3)可知, 下方悬空结构给予的支撑力  $Q_c$  需逐渐增大。

悬空结构所承载的载荷为:

$$P = Q_c / l_3 + (h_3 + \Delta h) \gamma H_1 \quad (4)$$



式中: $l_3$ 为悬空结构岩块 3 的长度,m; $h_3$ 为悬空结构岩块 3 的厚度,m; $\Delta h$ 为岩块 2 到岩块 3 层间岩层的厚度,m; $\gamma$ 为岩石的容重, $N/m^3$ ; $H_1$ 为上关键层的埋深,m。

由  $R_c = \frac{4h - 3l_2 \sin \theta_1}{4h - 2l_2 \sin \theta_2} \gamma H_1 l_2$  代入式(4)可得:

$$P = \left[ \frac{(8h - 6l_2 \sin \theta_1) l_2 H_1}{(2h - l_2 \sin \theta_2) l_3} + (h_3 + \Delta h) \right] \gamma \quad (5)$$

即悬空结构所能提供的支撑力  $Q_c$  至少需达到式(5)中  $P$ ,才可以维持上行式开采三铰拱式结构的整体稳定。

3 上行式开采覆岩破断特性模拟分析

在第 2 节对上行式开采覆岩结构及破断机理分析的基础上,根据 A603 及 A6-103 工作面的实际地质、开采条件,采用相似模拟的方法验证理论分析的准确性,并可对矿压特征进一步分析。

3.1 试验模型设计

试验模型共模拟 A6-1 煤层及 A6 煤层工作面走向长度 560 m,且考虑单侧边界条件,几何相似常数为 1/200。A6-103 上行式开采工作面开采时,模型左侧留设 1 000 mm 煤柱,右侧留设宽 400 mm 煤柱,模拟工作面开采长度 2 800 mm;A603 工作面开采时模型左侧留设宽 2 200 mm 煤柱,右侧留设宽 400 mm 煤柱,模拟工作面开采长度 1 600 mm;模型铺设高度为 1 175 mm。几何相似常数能满足实际试验要求,且无需施加补偿压力即可进行模拟。搭建的相似模拟模型如图 5 所示。

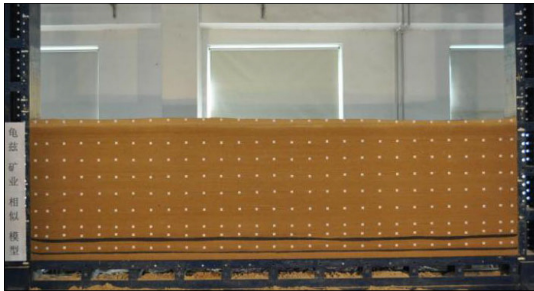


图 5 相似模拟模型

Fig.5 Analogy simulation model diagram

3.2 试验覆岩破断特性分析

试验开始后,首先按设计位置对 A603 工作面进行开挖,逐步形成了以岩块 3 作为支撑的悬空结构。然后按设计位置对 A6-103 工作面进行开挖,开挖过程中,上行式开采工作面通过下部煤层采空区切眼上方之前,顶板会逐渐形成岩块 1、岩块 2 组成的三铰拱式结构,且该结构中的岩块 2 未与下方

岩块 3 产生离层,则此时岩块 3 受压,同时施加了对岩块 2 的支撑力,此时三铰拱式结构较稳定,未产生较大的下沉、破断,具体如图 6 所示。

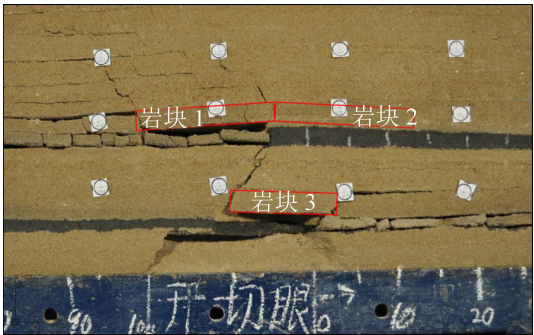


图 6 上行式开采三铰拱式结构模拟(推采至切眼上方前)  
Fig.6 Simulation of three - hinged arch structure in ascending mining (pushing to the front of the cutting hole)

根据相似模拟结果可知,上行式开采三铰拱式结构力学模型中  $\theta_1 = \theta_2 \approx 4^\circ$ 、 $l_2 \approx 16.2$  m、 $l_3 \approx 11.8$  m;另由地质资料可知  $h = 8.6$  m、 $h_3 = 10.6$  m、 $\Delta h = 18.61$  m。将上述数据带入式(5)可得:

$$P \approx [5.298H_1 + 29.21] \gamma \quad (6)$$

取  $\gamma = 25$  kN/m<sup>3</sup>,则  $P \approx (132.45H_1 + 730)$  MPa。

将“砌体梁”结构理论<sup>[16]</sup>中,断裂块体的铰接结构保持稳定的极限载荷计算式,应用到块体 3 中可得:

$$P_{\max} = \sigma_c / 30 + (\tan \varphi + 0.75 \sin \theta_3)^2 \quad (7)$$

式中: $\sigma_c$ 为悬空结构岩块 3 的单轴抗压强度,通过物理力学参数测试结果为 91.065 MPa; $\varphi$ 为悬空结构岩块 3 的内摩擦角,通过物理力学参数测试结果为 45.95°; $\theta_3$ 为岩块 3 的回转角,根据模拟结果约为 3°。

计算可知块体 3 的极限载荷  $P_{\max} \approx 4.18$  MPa。

通过第 2 节分析,悬空结构所能提供的支撑力  $Q_c$  至少需达到式(5)中  $P$  时,上行式开采三铰拱式结构才可以保持整体稳定。同时需保证  $P$  不能超过块体 3 的极限载荷  $P_{\max}$ ,即  $(132.45H_1 + 730) \leq 4.18$  MPa。计算可知,达到上述稳定条件时,  $H_1 \leq -0.05$  m,而此计算结果在现场环境中是不存在的。则上行式开采工作面推进至开切眼上方时,块体 3 会由于达到极限载荷发生失稳破断,无法进一步提供给上行式开采三铰结构足够的支撑力,即上行式开采三铰拱式结构在不采取任何措施的情况下无法继续保持稳定。相似模拟结果同时验证了这一点,如图 7 所示。上行式开采工作面推采至下部煤层采空区开切眼边界处时,层间的悬空结构发生二次失稳,导致上行式开采工作面顶底板突然下沉、破断。



图 7 上行式开采三铰拱式结构失稳(推采至开切眼上方)

Fig.7 Instability diagram of three - hinged arch structure in ascending mining (pushing to the top of the cutting hole)

## 4 三铰拱式不稳定结构下回采措施

根据第 2.3 节分析,认为推采至下部采空区开切眼边界处时,上行式开采三铰拱式结构不稳定,现场围岩存在破断下沉的安全风险。因此需要针对围岩采取稳定性监测及治理,其中主要的防治措施如下。

### 4.1 微震监测

现场通过安装 KJ768 微震监测系统,对微震事件的震源进行定位和能量计算,进而对采动影响区域内岩体破裂特征进行分析,确定震动和能量释放与开采活动的因果关系,岩层运动规律,最终实现上行式开采工作面围岩(包括顶板、底板层间岩层)破坏特征评价、围岩运动规律的实时监测分析,评价围岩稳定性。

1)井下测点布置。A6-103 工作面回风巷:在距工作面开切眼 120 m 处开始向外布置第 1 个微震测点,相邻测点间距约 30 m,回风巷内共布置 35 个微震测点。A6-103 工作面回风巷:在距工作面开切眼约 100 m 处开始向外布置第 1 个微震测点,相邻测点间距约 30 m,回风巷内共布置 34 个微震测点。A6-103 工作面联络巷:在距工作面回风巷约 20 m 处开始布置第 1 个微震测点,相邻测点间距约 30 m,联络巷内共布置 5 个微震测点。

2)井下拾震器布置。在 A6-103 工作面上回风巷内各布置 8 个可移动式拾震器,将拾震器通过专用连接件安装在特定锚杆上。锚杆长度 2.2 m,直径为 18 mm,外露长度约 20 mm,距离底板约 1.0 m,锚杆安设角度与水平面成 30°。

### 4.2 悬空结构充填治理

通过向底板未充分垮落区域内注浆,浆液以填充、渗透和挤密等方式为主,驱走土颗粒间的水分和

空气后填充其位置,经过一定时间将垮落的岩石胶结成 1 个整体,同时充填悬空结构下方的空间,提高悬空结构的极限载荷  $P_{\max}$ ,进而保持上行式开采三铰拱式的整体稳定。

1) 注浆工艺。钻探勘查选用了 ZDY1200S (MK-4)型矿用全液压坑道钻机,钻孔直径  $\phi 75$  mm。钻孔终孔至 A603 工作面底板以下 1 m 处。充填材料选用马丽散高分子发泡材料,注浆泵选用 QB 型气动注浆泵,注浆终孔压力 2~3 MPa。

2) 施工过程。通过在 A6-103 工作面上顺槽向 A603 采空区开切眼附近悬空结构区域施工的 19 个底板钻探孔勘查结果,空洞范围约 10 m×13 m,掉钻高度 6 m,角度 31°,计算空洞体积为 455 m<sup>3</sup>。并确定了使用其中的 ZK3、ZK4 钻孔进行注浆,施工剖面如图 8 所示。

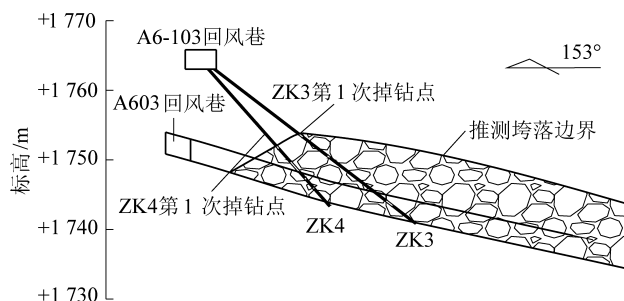


图 8 注浆钻探孔剖面

Fig.8 Section layout of grouting drilling hole

注浆共施工 56 h,注入速度约 0.5 m<sup>3</sup>/h,共计注入马丽散 19.5 m<sup>3</sup>,所用树脂为 10 t,催化剂 12 t,消耗马丽散共 22 t,终孔压力为 3.2 MPa。

### 4.3 现场实施效果分析

通过分析施工防治措施之后,A6-103 上行式开采工作面推采至下部煤层采空区切眼前后微震事件在顶底板岩层中的分布规律,可以得到:①工作面推采至切眼上方前,顶底板微震事件较少,且均匀分布于工作面前方区域内。②工作面推采至切眼上方时,由于实施了悬空结构充填治理,顶板微震事件频次和能量虽明显增加,但并未达到预警级别,且现场未发生顶底板突然下沉、破断。③工作面推采过切眼后,微震能量和与频次明显减少,在工作面前方区域内呈现均匀分布状态。现场采用的防治措施保证了 A6-103 上行式开采工作面的安全回采,维持了上行式开采三铰拱式结构的整体稳定,避免了顶底板破断下沉造成的安全风险。

## 5 结 论

1) 上行式开采工作面通过下部煤层采空区开

切眼上方之前,顶板会形成以下层煤开采产生的预定裂隙位置为中间铰接点的上行式开采三铰拱式结构,通过建立力学模型对上行式开采工作面顶底板破断规律进行力学分析及理论计算,得到了该模型的稳定条件判据及计算方程。通过对该力学模型的进一步解算,得到悬空结构所能提供的支撑力需不小于其所受载荷,才可以维持上行式开采三铰拱式结构的整体稳定,同时其所受载荷最大值与结构回转角度存在正相关关系。

2)通过相似模拟,验证了上行式开采三铰拱式结构的存在,且在不采取任何措施的情况下无法保持结构稳定,即下部煤层采空区切眼边界处的悬空结构会发生二次失稳,使得顶底板突然下沉、破断。

3)针对推采至下部采空区开切眼边界处时,上行式开采三铰拱式结构的不稳定性,根据现场实际情况提出了以微震监测、悬空结构充填治理为主的防治措施,确保了上行式开采工作面现场的安全回采。

参考文献 (References) :

[1] 谢和平,王金华.中国煤炭科学产能[M].北京:煤炭工业出版社,2014.

[2] 宋洪柱,中国煤炭资源分布特征与勘查开发前景研究[D].武汉:中国地质大学,2014

[3] 冯国瑞.煤矿残采区上行式开采基础理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2010.

[4] 汪理全.煤层群上行式开采技术及应用[J].煤炭学报,2001,26(S):76-79.

WANG Liquan.The technology and application of ascending mining in coal seams[J].Journal of China Coal Society,2001,26(S):76-79.

[5] 冯国瑞,杨创前,张玉江,等.刀柱残采区上行长壁开采支承压力时空演化规律研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(5):857-866.

FENG Guorui, YANG Chuangqian, ZHANG Yujiang, et al. Temporal and spatial evolution law of abutment pressure during upward long-wall mining in the wedge [J]. Journal of Mining & Safety Engineering[J].Sustainability,2019,36(5):857-866.

[6] FENG Cui, YANG Yanbin, LAI Xingping, et al. Experimental study on the effect of advancing speed and stopping time on the energy release of overburden in an upward mining coal working face with a hard roof.2019,12(1):1-23.

[7] 王明立,张华兴,张刚艳.刀柱式老采空区上行长壁开采的采矿安全评价[J].采矿与安全工程学报,2008,25(1):87-90.

WANG Mingli,ZHANG Huaxing,ZHANG Gangyan.Safety assessment of ascending longwall mining over old rib pillar gobs[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2008,25(1):87-90.

[8] 徐刚.综放工作面切顶压架机理及应用研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2019.

[9] 吴宝杨,邓志刚,赵善坤,等.上行式开采过程中危险源分析及

现场验证[J].地下空间于工程学报,2016,12(S2):863-869.

WU Baoyang,DENG Zhigang,ZHAO Shankun,et al.Hazard source analyses and field verification in upward mining process [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(S2):863-869.

[10] 吴宝杨,邓志刚,冯宇峰,等.特殊条件下层间岩层对上行式开采的影响分析[J].煤炭学报,2017,42(4):842-848

WU Baoyang,DENG Zhigang,FENG Yufeng,et al.Analysis of the influence of interlayer rock on ascending mining under special conditions [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4):842-848.

[11] 许家林,朱卫兵,鞠金峰.浅埋煤层开采压架类型[J].煤炭学报,2014,39(8):1625-1634.

XU Jialin,ZHU Weibing,JU Jinfeng.Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J].Journal of China Coal Society,2014,39(8):1625-1634.

[12] 侯志杰,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.

[13] 黄庆享,浅埋煤层长壁开采顶板结构及岩层控制研究[M].徐州:中国矿业大学出版社,2000.

[14] 钱鸣高,缪协兴,许家林.岩层控制中的关键层理论研究[J].煤炭学报,1996,21(3):225-230.

QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jianlin.Theoretical study of key stratum in ground control[J].Journal of China Coal Society, 1996,21(3):225-230.

[15] 许家林,钱鸣高.覆岩关键层位置的判别方法[J].中国矿业大学学报,2000,29(5):463-467.

XU Jialin,Qian Minggao.Method to distinguish key strata in overburden[J].Journal of China University of Mining & Technology, 2000,29(5):463-467.

[16] 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,JU Jinfeng.Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam[J].Journal of China Coal Society,2014,39(8):1625-1634.

[17] 钱鸣高,石平五,许家林.矿山压力与岩层控制[M].徐州:中国矿业大学出版社,2010.

[18] 宋振骐,蒋宇静,刘建康.“实用矿山压力控制”的理论和模型[J].煤炭科技,2017(2):1-10.

SONG Zhenqi,JIANG Yujing,LIU Jiankang.Theory and model of “practical method of mine pressure control” [J].Coal Science & Technology Magazine,2017(2):1-10.

[19] 朱卫兵.浅埋近距离煤层重复采动关键层结构失稳机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2010.

[20] 吴爱民,左建平.多次动压下近距离煤层群覆岩破坏规律研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2009,24(4):1-6.

WU Aimin,ZUO Jianping. Research on the effects of multi-mining on activity law of rock strata in close coal seams [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition),2009,24(4):1-6.