

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.274

引用格式:石占山,范永君,李刚,等.柔模砼墙沿空留巷工作面覆岩垮落结构及裂隙演化规律[J].重庆大学学报,2026,49(6):1-13.



柔模砼墙沿空留巷工作面覆岩垮落结构及裂隙演化规律

石占山¹,范永君¹,李刚¹,迟国铭^{1,2},刘航¹,陈文杰¹

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁阜新 123000; 2. 国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司大柳塔煤矿,陕西神木 719315)

摘要:为研究沿空留巷开采过程中工作面顶板覆岩垮落结构和裂隙演化规律与传统留煤柱开采的差异,以大柳塔煤矿 52605 和 52606 工作面为工程背景。通过 2 组相似材料模拟实验,模拟 2 种工况开采过程,并记录岩层移动及裂隙演化。研究表明,柔模砼墙沿空留巷时,一次采动留巷结束形成的裂隙率小于二次采动,而传统留煤柱开采后煤柱两侧工作面覆岩裂隙形成演化规律接近。2 种开采方式形成的裂隙率、裂隙类型、垮落范围和垮落角存在差异,柔模砼墙沿空留巷工作面覆岩裂隙率为 5.075 6%、垮落范围为覆岩 50 m 内、垮落角位于 31°~86.9° 范围之间,以离层裂隙为主。留煤柱开采工作面覆岩裂隙率为 2.860 4%、垮落范围为覆岩 40 m 内、垮落角位于 50°~52° 范围之间,以沿垮落倾角发育的剪切裂隙为主。沿空留巷工作面砼墙两侧开采结束后,砼墙顶板岩层未发生剪切滑落,形成铰接结构。而留煤柱工作面煤柱两侧开采结束后岩层整体切落,上覆岩层在砼墙及煤柱两侧形成结构差异明显,对于沿空留巷工作面的砼墙载荷分布形成显著的集中应力作用。

关键词:无煤柱开采;覆岩垮落;采动裂隙;柔模混凝土墙;相似材料模拟

中图分类号:TD353

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)06-001-13

Caving structure and crack evolution of overlying strata in gob-side entry retaining with flexible formwork concrete walls

SHI Zhanshan¹, FAN Yongjun¹, LI Gang¹, CHI Guoming^{1,2}, LIU Hang¹, CHEN Wenjie¹

(1. School of Mines, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin, Liaoning 123000, P. R. China;

2. Daliuta Coal Mine, National Energy Group Shendong Coal Group Limited Liability Company, Shenmu, Shaanxi 719315, P. R. China)

Abstract: This study investigates the differences in roof caving structure and crack evolution between gob-side entry retaining and traditional coal pillar mining. Taking the 52605 and 52606 working faces of Daliuta Coal Mine as the engineering background, two sets of similar-material simulation experiments were conducted to reproduce

收稿日期:2024-03-06 网络出版日期:2024-08-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004118, 52174077)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52004118, 52174077).

作者简介:石占山(1989—),男,博士,副教授,主要从事瓦斯灾害防治、矿山压力与岩层控制方向的研究,(E-mail) shizhanshan@163.com。

通信作者:范永君(2000—),男,硕士研究生,主要从事系统工程与智能矿山方面的研究,(E-mail)1390475142@qq.com。

the mining processes under both conditions. The movement and fracture evolution of the overlying strata were systematically recorded and analyzed. The results show that, under gob-side entry retaining with flexible formwork concrete walls, the crack development rate at the end of primary mining is lower than that during secondary mining. In contrast, under traditional coal pillar mining, the crack evolution patterns on both sides of the coal pillar are similar. Significant differences are observed between the two mining methods in terms of crack rate, crack type, caving range, and caving angle. Specifically, for gob-side entry retaining, the crack rate of overlying strata reaches 5.0756%, the caving range extends to within 50m, and the caving angle varies from 31° to 86.9° . For coal pillar mining, the crack rate is 2.8604%, the caving range is within 40 m, and the caving angle ranges from 50° and 52° , with shear cracks dominating along the caving direction. After mining with gob-side entry retaining, the roof strata on both sides of the concrete wall remain stable without sliding, forming a hinged structural system. In contrast, in coal pillar mining, the overlying strata on both sides of the pillar tend to fail together as a whole after extraction. These structural differences lead to distinct load transfer mechanisms, resulting in significant stress concentration effects on the concrete wall in gob-side entry retaining faces.

Keywords: non-pillar mining; overlying strata caving; mining-induced fractures; flexible formwork concrete wall; similar-material simulation

采场矿压显现规律与覆岩运移形成的垮落结构及裂隙分布密切相关,当前随着煤炭采出率要求的提高,柔模砼墙沿空留巷得到了广泛应用,通过对比传统留煤柱开采与柔模砼墙沿空留巷开采工作面覆岩垮落结构及裂隙分布规律,能够为充填留巷开采与传统留煤柱矿压显现规律差异的形成机理提供依据。

当前对采场覆岩垮落结构特征及裂隙演化规律国内外学者已取得丰富的研究成果,Hebblewhite^[1]以悉尼南新南威尔士州南部煤田为例详细阐述了长壁工作面顶板覆岩的位移和破裂规律及其预测模型和主要影响参数。Rošer等^[2]针对边柱法开采安全的临界岩层移动值预测。Vinaya等^[3]研究了抽采线对矿柱稳定性的影响。余伊河等^[4]认为采空区边界上覆岩层中剪切错动裂隙和张拉离层裂隙共同发育。高永格等^[5]通过用钻孔成像装置分析松散层下沿空留巷上覆顶板岩层裂隙破断规律,认为受二次采动影响顶板覆岩破碎程度加剧。王婉洁等^[6]发现采空区中部区域与边界区域上覆岩层存在不同的变化规律。Zhang等^[7]发现岩层的采动裂隙分布不仅与岩层的特性有关,同时与岩层的完整性有关。梁冰等^[8]通过对水平应力与顶板断裂线位置的相关性研究,发现水平应力与顶板垮落角大小的关系。李宏艳等^[9]对采动影响覆岩裂隙演化的几个重要阶段的变化趋势和程度进行定量描述。苗磊刚等^[10]发现大采高工作面垮落带、裂隙带同采高的关系及顶板裂隙衍生特征。林海飞等^[11]研究了沿空留巷开采下覆岩切顶侧与未切顶侧的裂隙特征,分析了采动覆岩裂隙动态发育过程及应变分布规律。

沿空留巷开采是无煤柱开采的主要方式之一,前人针对无煤柱开采的110工法等^[12-14]已开展了大量研究,但当前对于柔模砼墙支护沿空留巷相似材料模拟实验及其覆岩垮落结构裂隙演化规律研究较少^[15-18]。留巷开采下砼墙受一次成巷及二次复用的多重采动影响,砼墙及留巷上方载荷往往表现为非对称性,因此其顶板覆岩垮落结构与裂隙演化与留煤柱开采有较大差异。笔者采用相似材料模拟实验模拟沿空留巷工作面开采过程,揭示覆岩垮落结构及裂隙演化规律,为柔模砼墙沿空留巷工程参数设计提供理论指导。

1 模拟过程

1.1 工况背景

以大柳塔煤矿52605工作面和52606工作面为工程背景,采煤方法为综合机械化一次采全高后退式走向

长壁采煤法,采用沿空留巷回采工艺。工作面地面标高1 160~1 280 m,底板标高1 037.09~1 075.70 m,开切眼与回撤通道之间高差约37.8 m,工作面走向长度4370 m,倾向长度305.4 m,面积131.3万 m^2 ,煤层平均厚度4.3 m,如图1所示^[18]。



图1 大柳塔煤矿52605和52606工作面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working faces 52605 and 52606 in Daliuta coal mine

1.2 相似条件确定及配比

根据现场条件及相似定律确定模型相似常数,其中几何相似比 $\alpha_l=1:100$;容重相似比 $\alpha_\gamma=1:1.6$;时间相似比 $\alpha_t=1:10$ 。推导过程为

$$\alpha_l = \frac{L_H}{L_M} = 100, \quad (1)$$

$$\alpha_t = \sqrt{\alpha_l} = 10, \quad (2)$$

式中: α_l 为几何相似比; α_t 为时间相似比; L_H 为原型长度,m; L_M 为模型长度,m。

在相似模拟中,起控制作用的主要物理量有时间、煤岩密度、强度,由式(3)计算出模拟岩层强度相似比为160。

$$\alpha_\sigma = \alpha_\gamma \cdot \alpha_l = 160, \quad (3)$$

式中: α_σ 为强度相似比; α_l 为几何相似比; α_γ 为容重相似比。

根据实验原型煤岩物理力学参数,通过换算和不同配比材料力学测试,综合原型中各模拟岩层单向抗压强度和几何相似比,先得出模型中各模拟岩层抗压强度,再根据大量的相似材料正交配比实验,最终得出模型中各岩层的配比号,如表1所示。各分层材料用量计算公式为

$$G = l \times b \times h \times \gamma_p, \quad (4)$$

式中: G 为模型分层材料总重,N; l 为模型长度,m; b 为模型宽度,m; h 为模拟分层厚度,m; γ_p 为该模拟岩层的容重。

1.3 模型设计尺寸及加载条件

采用平面应变模型,模型长3 m,高2 m,宽0.2 m。模型底部以及四周有固定位移约束,上部采用柔性压力加载的方式,施加连续应力载荷,此载荷为上覆一定岩体自重应力折减后的实验值,煤层平均埋深156.295 m,而模型模拟上方覆岩高度为135 m,根据相似材料模拟实验加载要求,折减后的实验加载应力为0.336 7 MPa,计算过程为

$$\sigma = \gamma \cdot h = \rho \cdot g \cdot h \approx 53.876 \text{ MPa}, \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\alpha_\sigma} \approx \frac{53.876 \text{ MPa}}{160} \approx 0.336 7 \text{ MPa}, \quad (6)$$

式中: σ 为自重应力,MPa; γ 为折减覆岩平均容重, N/m^3 ; h 为折减覆岩平均高度,m; α_σ 为强度相似比; σ_m 为实验加载应力,MPa。

1.4 模型搭建

根据工作面实际开采情况确定煤层平均开采高度为4.3 m,铺设相似材料时,同属性岩层按1 cm铺设1层直至铺设至本岩层指定高度为止,同一层相似材料铺设要连续不间断,搭建后晾晒15 d至干燥,如图2所

示。模拟工作面等距推进过程中待垮落裂隙状态趋于稳定时利用数码相机捕捉不同垮落时刻相似模型表面形态变化图片。

表1 试验相似模型煤岩的厚度、强度指标及模型材料配比

Table 1 Aggregate proportions of coal-rock in the similar simulation model

层号	岩层	模型 厚度/cm	原型抗压 强度/MPa	模拟抗压 强度/MPa	视密度/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$)	模拟视密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	配比号
1	细粒砂岩	9.0	46.22	0.29	2 620	1.612	1.66×10^4	437
2	粉砂岩	5.0	24.95	0.16	2 500	1.623	1.50×10^4	537
3	5-2煤	4.3	21.47	0.13	1 400	1.581	0.35×10^4	455
4	粉砂岩	5.5	24.95	0.16	2 500	1.622	1.50×10^4	537
5	细粒砂岩	21.0	46.22	0.29	2 620	1.612	1.66×10^4	437
6	粉砂岩	15.0	24.95	0.16	2 500	1.634	1.50×10^4	537
7	细粒砂岩	21.5	46.22	0.29	2 620	1.617	1.66×10^4	437
8	粉砂岩	4.0	24.95	0.16	2 500	1.639	1.50×10^4	537
9	细粒砂岩	17.0	46.22	0.29	2 620	1.615	1.66×10^4	437
10	粉砂岩	4.5	24.95	0.16	2 500	1.643	1.50×10^4	537
11	钙质砂岩	5.5	122.40	0.76	2 780	1.564	1.71×10^4	337
12	粉砂岩	8.0	24.95	0.16	2 500	1.643	1.50×10^4	537
13	泥岩	4.0	28.06	0.17	2 320	1.607	1.06×10^4	455
14	粉砂岩	5.0	24.95	0.16	2 500	1.639	1.50×10^4	537
15	细粒砂岩	4.0	46.22	0.29	2 620	1.618	1.66×10^4	437
16	泥岩	4.0	28.06	0.17	2 320	1.613	1.06×10^4	455
17	粉砂岩	16.0	24.95	0.16	2 500	1.643	1.50×10^4	537

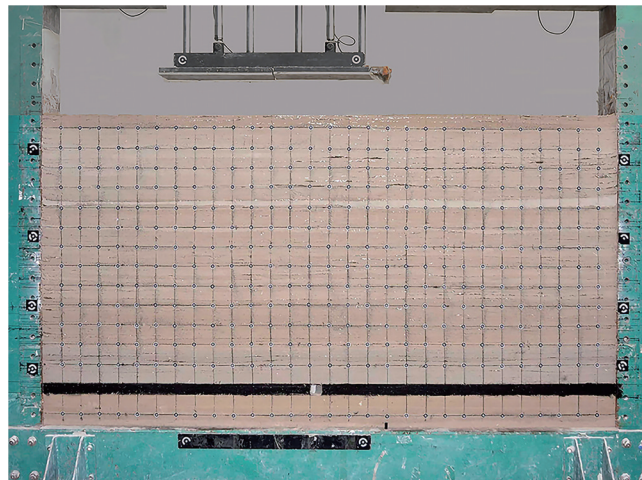


图2 相似材料模拟实验模型

Fig. 2 Similar-material simulation experimental model

在工作面模拟采煤机开采过程,每次开挖 10 cm,模拟采煤机开采运行机制,利用时间相似条件计算模拟开挖间隔时间约为 15~20 min,记录顶板覆岩垮落及工作面裂隙随工作面演化情况。模拟采煤机在 52605 工作面和 52606 工作面分别从砟墙左侧和右侧向两端开采,过程如图 3 所示。

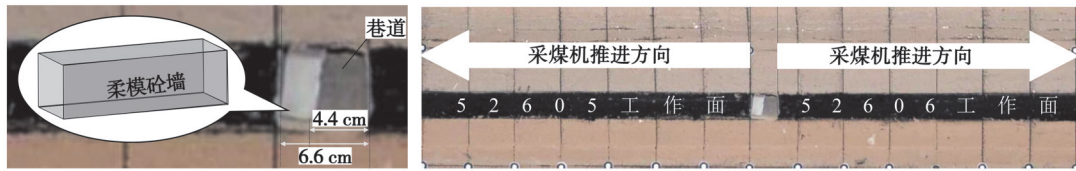


图 3 沿空留巷开采工作面布置

Fig. 3 Layout of mining face along gob-side entry

在相似材料模型的煤线中部掏空 6.6 cm 左右模拟掘进过程,并在左侧放置水泥块模拟柔模砧墙的筑造,右侧预留 5.4 cm 供 52606 工作面采掘所用。用水泥等材料混合制作 1 个长 30 cm、宽 1.2 cm、高 3 cm 的长方体,模拟 52605 工作面 and 52606 工作面中间的柔模砧墙(长×宽×高为 0.3 m×0.012 m×0.03 m)。

2 实验结果分析

2.1 工作面开挖过程中岩层垮落结构分析

52605 工作面开采过程中覆岩分别在开采至 50、58、67、79、88、101 m 时发生垮落,如图 4 所示。

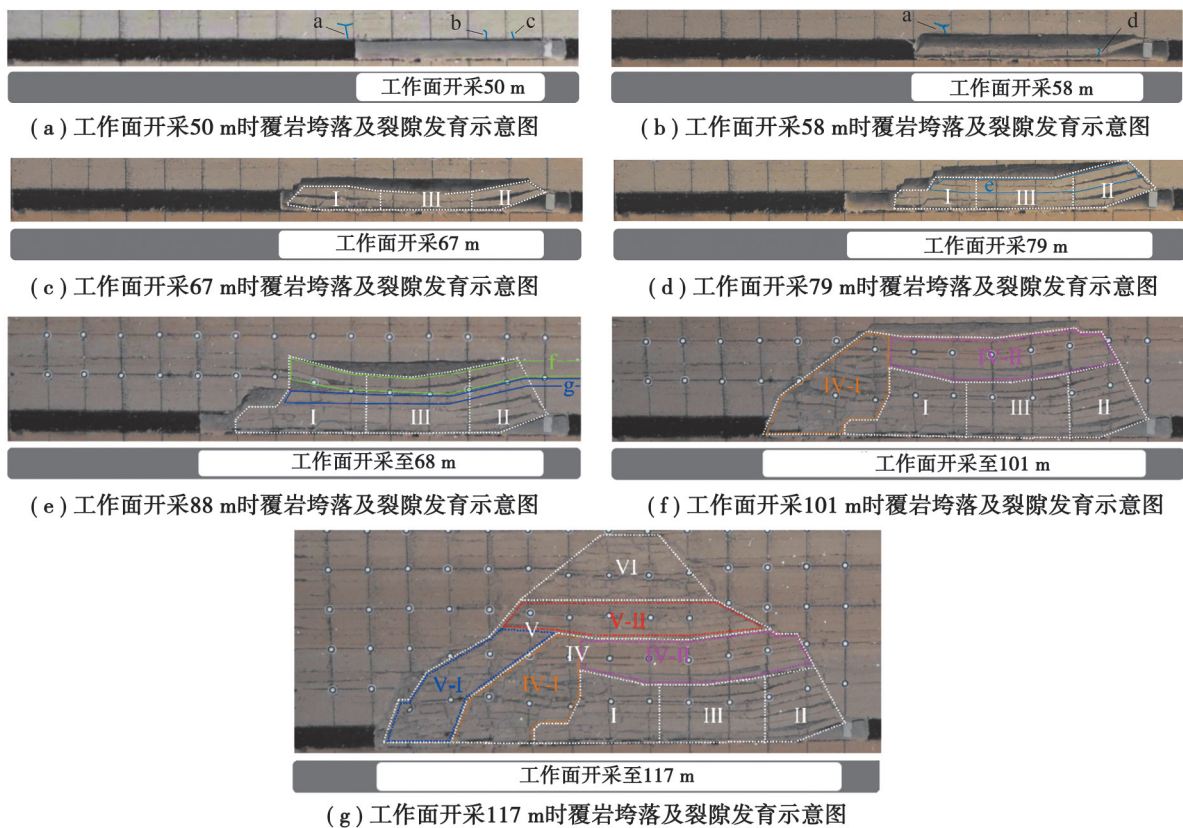


图 4 52605 工作面覆岩垮落及裂隙发育图

Fig. 4 52605 working face overlying strata caving

1)当工作面开采至 50 m 时,如图 4(a)所示。直接顶 a 处出现 1 条横纵交叉的采动裂隙,b、c 处出现 2 条高倾角采动裂隙。

2)当工作面开采至 58 m 时,如图 4(b)所示。直接顶垮落,垮落厚度约为 2 m;直接顶以砧墙上部与岩层铰接点为轴发生回转运动反倾向堆砌在砧墙左部。直接顶回转过程中在 d 处出现一条向左上方 45°发育的剪切裂隙。

3)当工作面开采至 67 m 时,如图 4(c)所示。垮落基本顶厚度约为 4.2 m,离层区间约为 61 m 并堆砌在直接顶上, I 和 II 区域内各出现 1 条宽度在 0.5 m 左右的离层裂隙,且伴随多条纵向次生裂隙, III 区域内裂隙发育不充分。

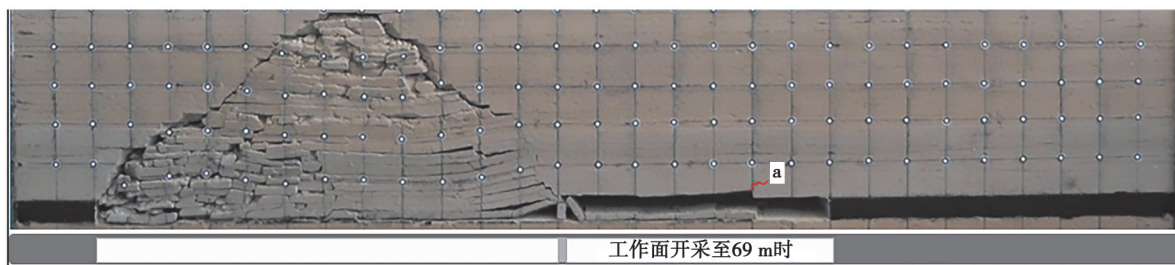
4)当工作面开采至79 m时,如图4(d)所示。岩层e垮落,厚度约为4 m,离层区间约65 m;在I区域离层裂隙出现大量纵向次生裂隙,II和III区域内出现多条离层裂隙,但III区域内裂隙被上覆岩压实趋于闭合。

5)当工作面开采至88 m时,如图4(e)所示。岩层f弯曲下沉,挤压下伏岩层g使其垮落,下沉高度约为3 m,离层区间约为56 m,垮落岩层形成“三带”结构,I区域内出现少量破碎结构,II和III区域内出现大量沿岩层理分离的离层裂隙,但III区域垮落岩层被弯曲下沉带挤压,裂隙大量闭合。

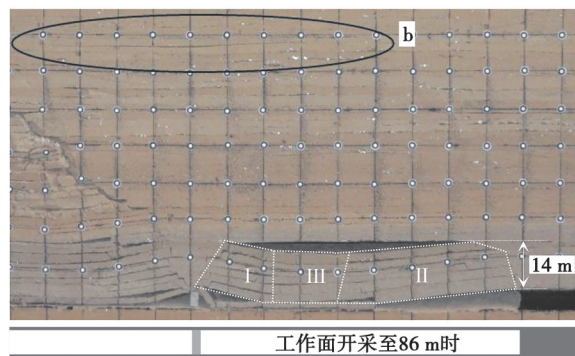
6)当工作面开采至101 m时,如图4(f)所示。岩层f与g受覆岩作用一同垮落,随工作面开采覆岩垮落到IV区域岩层厚度约为13 m,离层区间约为66 m;I区域内出现大量次生裂隙导致岩层破碎变形,II区域内裂隙呈扩大趋势,III区域内裂隙出现张开趋势,IV-I区域内裂隙岩层破碎裂隙丰富,IV-II内为未充分发育的离层裂隙。

7)当工作面开采至117 m时,如图4(g)所示。覆岩垮落到V和VI区域内,I区域内岩层破碎范围扩大,II区域为离层裂隙维持稳定且岩层回转角度近乎一致,III区域较上次垮落生成较多纵向次生裂隙,裂隙在V-II和IV-II垮落区域为离层裂隙,在IV-I、V-I和VI区域内岩层破碎。

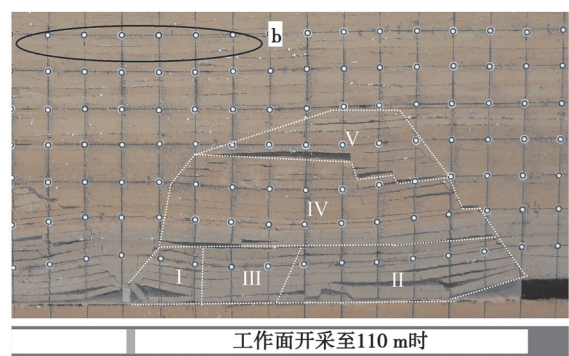
实验暂停一段时间,待52605工作面上方覆岩稳定后,对52606工作面进行模拟开采。在砗墙右侧,自左向右开采,随着采煤机推进,上覆岩层自下而上出现细小裂隙,且逐渐明显、向上延伸,覆岩分别在工作面开采至约40、69、86、110、125、139 m时发生垮落,如图5所示。



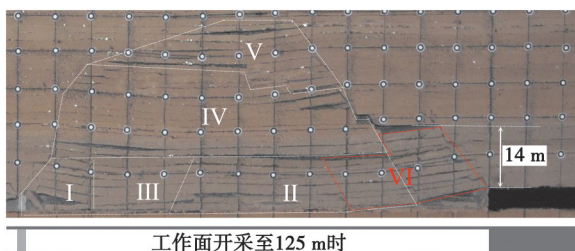
(a) 52606工作面开采至69 m时覆岩垮落及裂隙发育示意图



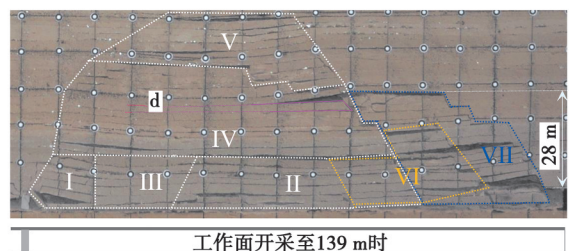
(b) 工作面开采至86 m时覆岩垮落及裂隙发育示意图



(c) 工作面开采至110 m时覆岩垮落及裂隙发育示意图



(d) 工作面开采至125 m时覆岩垮落及裂隙发育示意图



(e) 工作面开采至139 m时覆岩垮落及裂隙发育示意图

图5 52606工作面开采覆岩垮落过程

Fig. 5 Caving process of overlying strata during mining at working face 52606

- 1)当工作面开采至 40 m 时,纵向裂隙发育明显,顶板出现离层。
- 2)当工作面开采至 69 m 时,如图 5(a)所示。直接顶垮落,垮落的直接顶厚度约为 2 m,离层区间约为 50 m;直接顶以其与砌墙的接触点为轴回转垮落至采空区破断,并在 a 处产生向上发育的剪切裂隙。
- 3)当工作面开采至 86 m 时,如图 5(b)所示。岩层弯曲下沉高度为 14 m,离层区间约为 85 m,在砌墙上方向约 67 m 处的 b 区域出现 1 条长约 70 m 宽约 0.2 m 的细长贯通裂隙。
- 4)当工作面开采至 110 m 时,如图 5(c)所示。Ⅳ区域内岩层整体垮落,垮落厚度约为 23 m,离层区间约为 85 m;b 处的裂隙逐渐闭合,Ⅰ和Ⅲ区域内裂隙稳定,Ⅱ区域内裂隙随工作面开采逐渐张开扩大,Ⅳ区域内裂隙未充分发育,Ⅴ区域内出现少量离层裂隙。
- 5)当工作面开采至 125 m 时,如图 5(d)所示。岩层垮落到Ⅵ区域内,垮落厚度约为 14 m,离层区间约为 30 m;区域Ⅰ和Ⅲ中裂隙稳定,区域Ⅱ中裂隙因上方覆岩作用减小或闭合,区域Ⅳ中裂隙发育缓慢,Ⅴ区域内岩层缓慢下沉裂隙逐渐扩大张开,Ⅵ区域内整个垮落岩层以离层裂隙为主且区域内裂隙被压实。
- 6)当工作面开采至 139 m 时,如图 5(e)所示。岩层垮落到Ⅶ区域内,垮落高度约 28 m,长度约 40 m;Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区域内裂隙稳定,Ⅳ区域内岩层 d 受上覆岩层挤压垮落压实下伏岩层使区域Ⅳ内裂隙宽度减小,区域Ⅴ内岩层弯曲下沉程度加剧裂隙减小,区域Ⅶ以离层裂隙为主裂隙宽度较大。

2.2 覆岩裂隙率演化规律分析

对不同垮落时刻的模型拍照记录,使用 Photoshop 软件对采集的图像编辑并对杂点等清除;再通过 PCAS 系统自动识别裂隙网络中的区块,并修复裂隙段,去除杂点,识别裂隙网络,输出裂隙几何参数和统计参数,显示结果矢量图像。将裂隙网络的各种几何参数显示于数据表,包括裂隙的节点数,裂隙数,裂隙长度、宽度、面积、方向等,并自动统计得到裂隙率,裂隙分形维数,概率熵,平均长度、宽度、面积等统计参数,实现岩土体、各类材料中裂隙网络的定量分析,过程如图 6 所示。从 PCAS 系统导出得到采煤机采至不同距离工作面顶板裂隙分布变化,裂隙图如图 7 和图 8 所示。

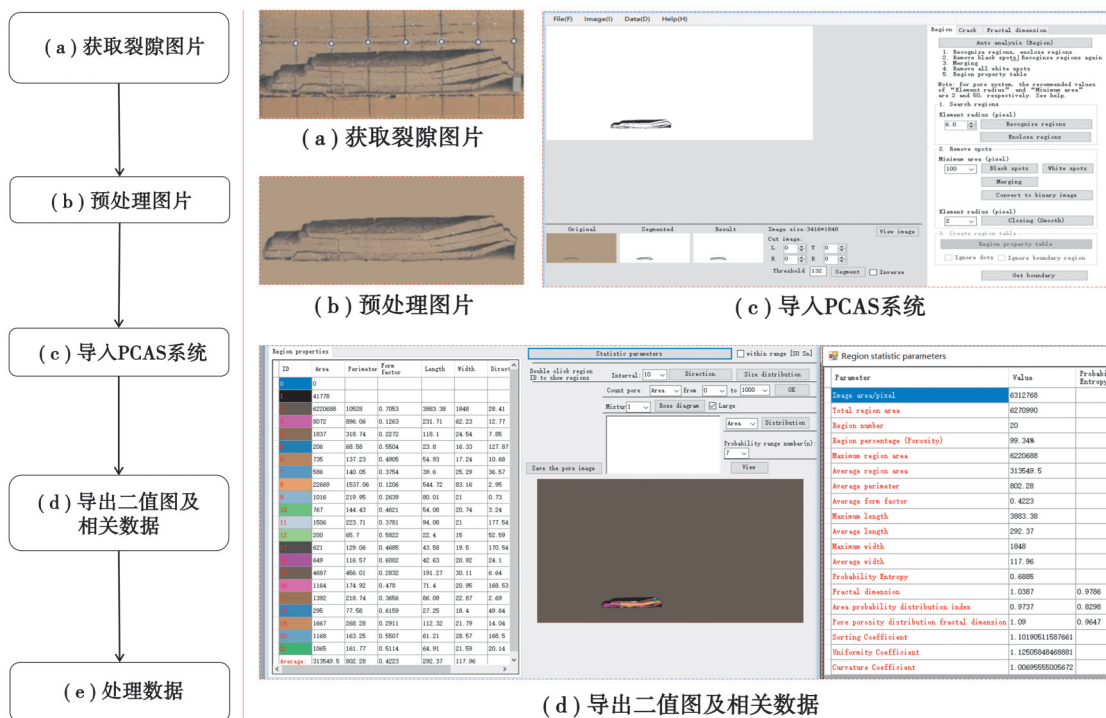


图 6 裂隙图像处理过程
Fig. 6 Fissure image processing process

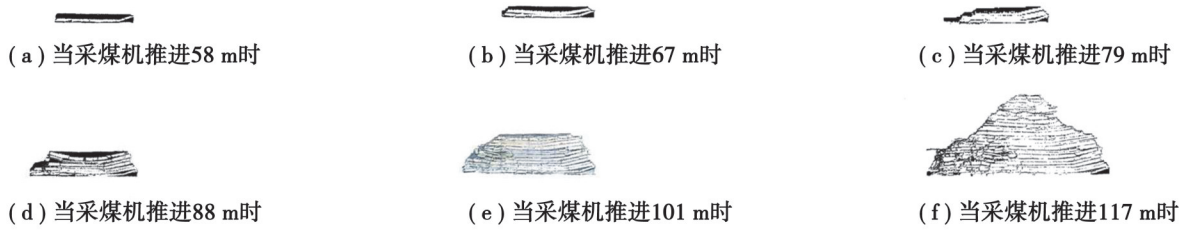


图7 沿空留巷法开采52605工作面覆岩裂隙演化过程

Fig. 7 Evolution process of overlying rock fractures in mining face 52605 using gob-side entry retaining method

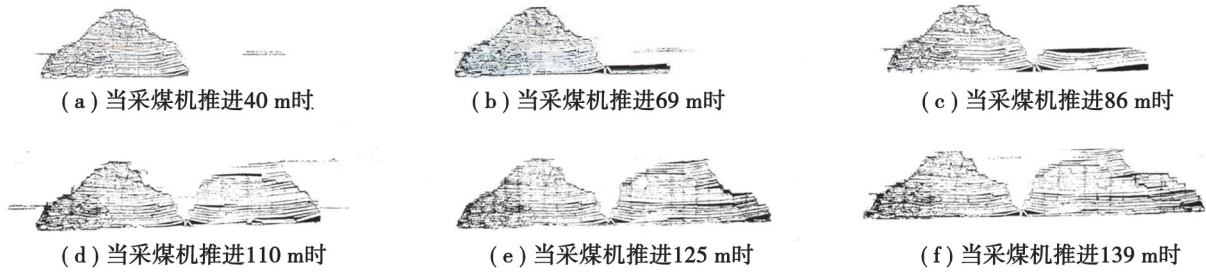


图8 沿空留巷法开采52606工作面覆岩裂隙演化过程

Fig. 8 Evolution process of overlying rock fractures in mining face 52606 using gob-side entry retaining method

在上述处理后的图片中,黑色部分代表裂隙,通过图片像素中黑色像素值 b 同总像素值 a 的比值得出裂隙率 P ,计算过程如式(7)所示;该过程使用PCAS系统实现,结果如表2所示。

$$P = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (7)$$

表2 52605和52606工作面随采煤机推进覆岩裂隙率值

Table 2 The ratio of overlying rock fractures in the 52605 and 52606 working faces as the coal mining machine advances

52605工作面 推进距离/m	裂隙率/%	影响覆岩 范围/m	垮落范围/m	52606工作面 推进距离/m	裂隙率/%	影响覆岩 范围/m	垮落范围/m
58	0.570 0	2	2	40	0.010	0	0
67	0.571 2	4	4	69	0.240	2	2
79	0.665 8	8	8	86	0.912	14	14
88	0.807 4	14	14	110	1.684	50	50
101	1.005 3	26	26	125	2.087	50	14
117	1.796 6	49	49	139	3.279	50	28

根据表2中各变量的数值,使用origin软件建立裂隙率同采煤机推进距离的关系曲线 Z_1 和 Z_2 ,通过多项式拟合得出相应的拟合函数图像 Y_1 和 Y_2 ,如式(8)(9)所示, R^2 均大于0.95; Y_2 函数图像斜率不断增加, Y_1 函数图像斜率变化不明显,如图9所示。发现二次采动的52606工作面,顶板覆岩裂隙率的演化趋势与一次采动52605工作面相比更为迅速且不稳定。

$$Y_1 = 1.520 48 \times 10^{-6} x + 1.481 47 \times 10^{-6} x^2 - 0.003 05, \quad (8)$$

$$Y_2 = -3.359 45 \times 10^{-4} x + 3.803 68 \times 10^{-6} x^2 - 0.008 31. \quad (9)$$

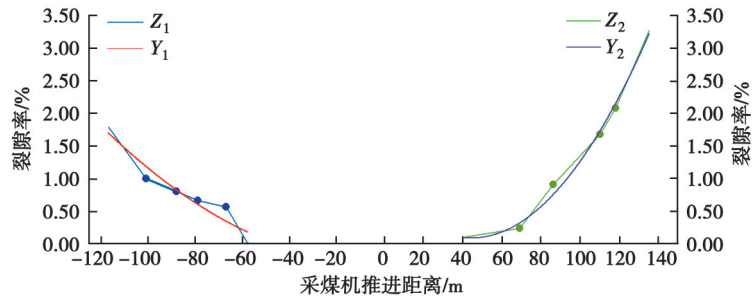
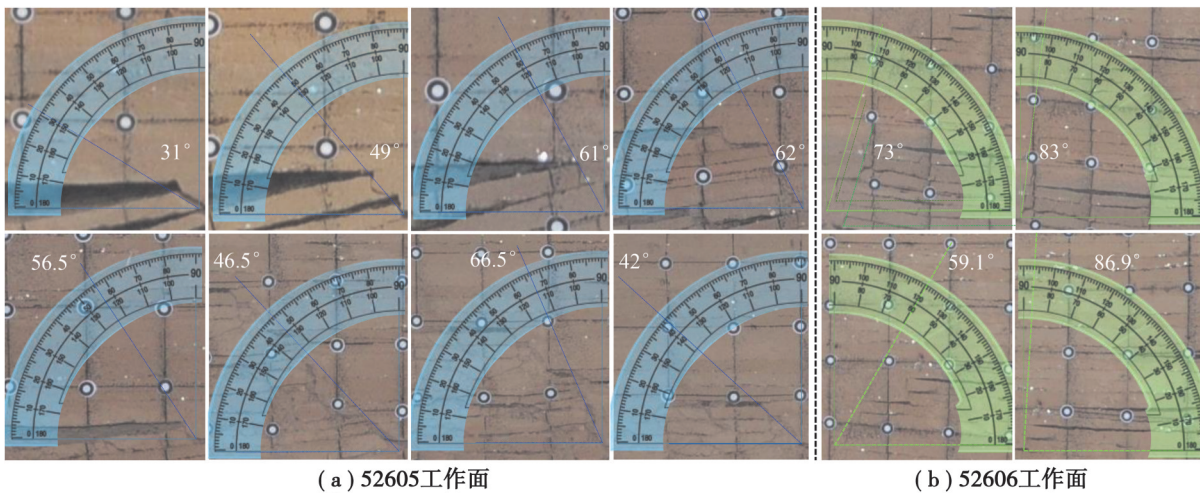


图 9 留巷法开采 52605 工作面(左)和 52606(右)工作面覆岩裂隙率演化过程

Fig. 9 Evolution process of overlying rock fracture rate in 52605 working face (left) and 52606 working face (right) during excavation using gob-side entry retaining method

2.3 覆岩垮落角度演化规律分析

定义煤层倾向线平行的方向为 0°或 180°,测量顶板覆岩垮落角度。沿空留巷开采下 52605 工作面和 52606 工作面顶板覆岩垮落角度随采煤机推进不断变化,如图 10 和图 11 所示。沿空留巷开采下,随 52605 和 52606 工作面推进覆岩垮落角度分阶段演化,过程较为复杂。砌墙附近 52605 工作面倾角演化过程为“增加

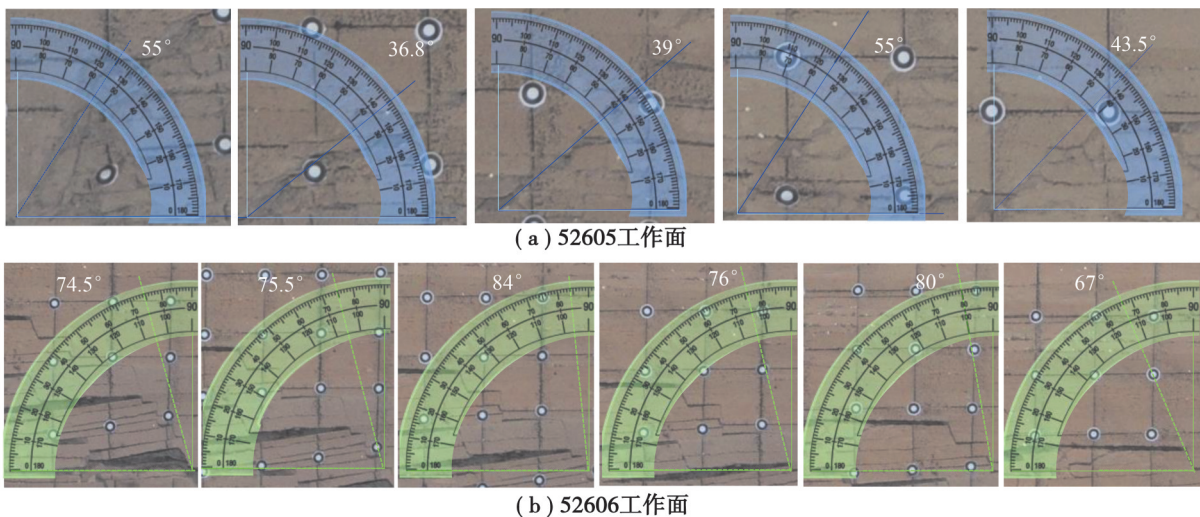


(a) 52605 工作面

(b) 52606 工作面

图 10 沿空留巷法开采下砌墙附近覆岩垮落倾角演化过程

Fig. 10 The inclination angle of overlying strata caving in the gob-side entry retaining method



(a) 52605 工作面

(b) 52606 工作面

图 11 沿空留巷法开采下工作面远离砌墙-侧覆岩垮落倾角演化过程

Fig. 11 Evolution process of overlying strata caving angle on the side of the working face away from the concrete wall in the gob-side entry retaining method

→减小→增加→减小”,52606工作面倾角演化过程为“增加→减小→增加”。远离砗墙一侧52605工作面倾角演化过程为“减小→增加→减小”,52606工作面远倾角演化过程为“增加→减小→增加”。52606工作面覆岩垮落角度普遍大于52505工作面。

3 留煤柱与柔模砗墙开采对比分析

为研究柔模砗墙开采同传统留煤柱开采顶板覆岩垮落结构和裂隙发育的规律不同,加做1组模拟留煤柱开采的相似模拟实验,实验材料的选取及模型堆砌方法与第1组实验一致,之后开挖过程中在两工作面间留设了长度20 cm煤层模拟开采过程中遗留的煤柱,如图12所示。

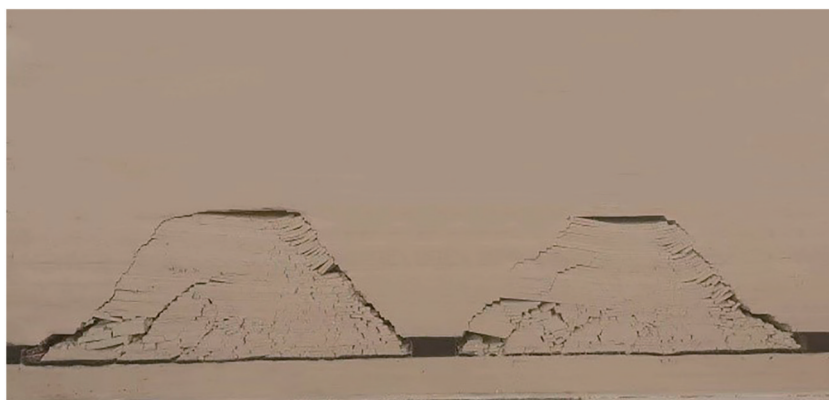


图12 模拟留煤柱开采相似模拟试验模型

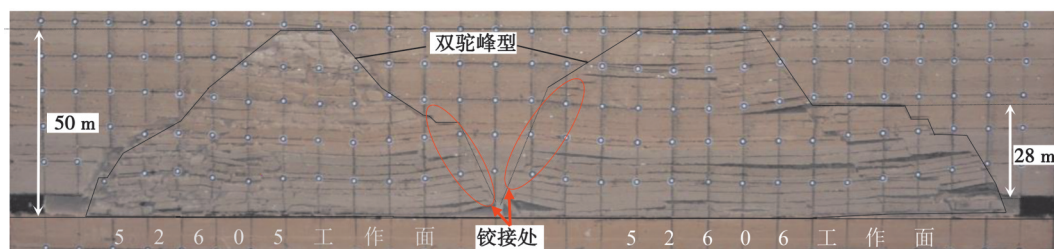
Fig. 12 Similar simulation test model for simulated coal pillar mining

3.1 垮落结构对比分析

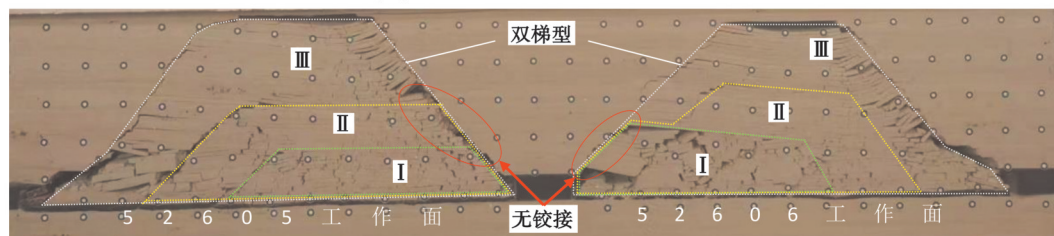
柔模砗墙开采时覆岩垮落结构整体呈“趋于双三角形的驼峰型”,如图13(a)所示;留煤柱开采垮落结构整体呈“双梯形”,如图13(b)所示。

柔模砗墙开采下,直接顶垮落时在砗墙两侧铰接,上覆岩层依次垮落形成由砗墙支撑的铰接结构。而留煤柱开采时覆岩沿着煤柱两侧剪切裂隙在I、II和III区域分别切落,垮落岩层未能向煤柱传递应力。

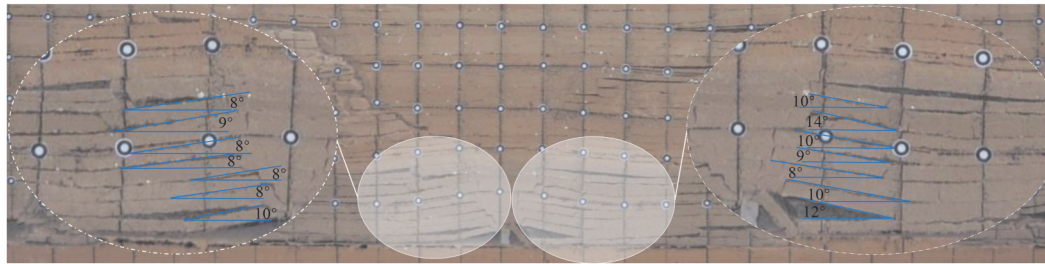
砗墙支撑时,上覆岩层作用力直接作用在直接顶与砗墙岩层铰接处,砗墙强度高,在夹角处未破碎让压,岩层整体发生旋转,铰接结构利于侧向支撑压力传递,对砗墙留巷支护不利;留煤柱开采时,由于煤柱比较松软,支撑能力弱,上覆岩层旋转时煤柱破碎,上覆岩层未能铰接于煤柱夹角处,整体表现为剪切滑落,减少了侧向支撑压力的传递,对巷道稳定有利。留设柔模砗墙时,砗墙两侧形成三角稳定结构支撑上覆垮落岩层,倾角约位于 $8^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间,多集中于 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 左右如图13(c)所示。



(a) 柔模砗墙开采覆岩垮落结构



(b) 留煤柱开采覆岩垮落结构



(c) 柔模砹墙开采下覆岩垮落形成铰接结构示意图

图 13 工作面覆岩垮落结构对比

Fig. 13 Comparison of overlying strata caving structures in the working face

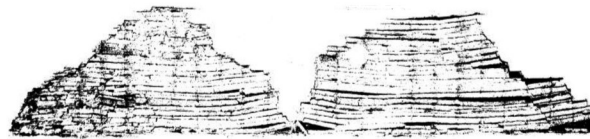
3.2 裂隙率演化规律对比分析

应用柔模砹墙开采的工作面覆岩裂隙率为 5.0756%、影响范围至顶板上方 50 m、砹墙附近覆岩裂隙以离层裂隙为主,两侧岩石较破碎,裂隙主要分布于远离砹墙的两侧覆岩,裂隙分布均匀。留煤柱开采工作面上覆岩层裂隙率为 2.8604%,影响范围至顶板上方 40 m,裂隙密集分布于各工作面两端的覆岩,主要为贯穿的剪切裂隙,两工作面中部的覆岩裂隙较少,裂隙分布不均匀如图 14 所示。

对比可知应用柔模砹墙开采时覆岩裂隙率更高,裂隙分布更均匀。产生上述现象原因是留煤柱开采时上覆岩层不易形成铰接结构,岩层整体切落,将裂隙压实使其闭合。而柔模砹墙开采时上覆岩层利于在垮落线边缘铰接,其铰接岩层会发生偏转,利于形成离层裂隙且裂隙不易闭合。



(a) 留煤柱开采下裂隙分布示意图



(b) 留巷开采下裂隙分布示意图

图 14 工作面顶板覆岩裂隙对比示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the comparison of overburden fractures on the roof of the working face

3.3 覆岩垮落角度演化规律对比分析

留煤柱开采时随着工作面推进覆岩垮落角度位于 50°~52°范围内,52605 工作面覆岩两侧垮落角度稳定维持在 50°左右;52606 工作面砹墙附近垮落倾角为 52°,远离煤柱一侧垮落倾角为 50°,如图 15 所示。

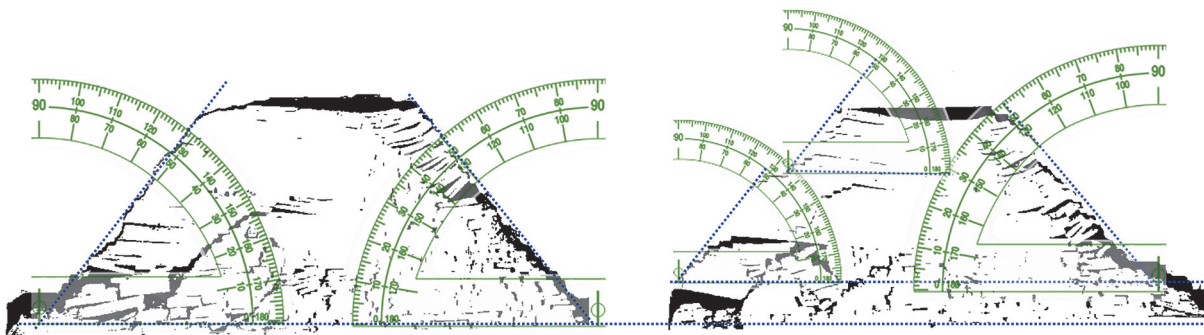


图 15 留煤柱开采工作面覆岩垮落角度

Fig. 15 Overlying strata caving angle in the coal pillar mining face

柔模矽墙开采时测量垮落角大约在 $31.0^{\circ}\sim 86.9^{\circ}$ 范围内,相比留煤柱开采,其垮落角度演化不稳定,垮落角度呈阶段性变化,受成巷时矽墙支护的影响52605工作面矽墙附近岩层垮落角度变化最为复杂,如图10和图11所示。

4 结 论

1)相似材料模拟实验分析结果表明:柔模矽墙开采时矽墙上方及附近区域离层裂隙集中且均匀分布越远离矽墙裂隙演化越复杂,因受二次采动影响随工作面开采距离增加52606工作面顶板覆岩裂隙的演化趋势较52605工作面相比更为迅速且不稳定。

2)沿空留巷工作面开采时上方岩层沿着垮落线形成铰接结构,并在垮落线附近形成大量离层裂隙。留煤柱工作面开采时垮落线附近岩层切落,中部离层裂隙大部分减小或闭合。沿空留巷开采时,工作面顶板覆岩裂隙与传统留煤柱开采相比,前者影响范围至顶板上方50 m,而后者影响范围至顶板上方40 m。前者裂隙率为5.075 6%,明显多于后者的裂隙率2.860 4%。矽墙上方岩层形成的铰接结构,使得沿空留巷工作面岩层不易切落,导致形成的裂隙率高于留煤柱开采工作面。

3)留煤柱开采时,随着工作面推进覆岩垮落角度位于 $50^{\circ}\sim 52^{\circ}$ 范围内,垮落角演化稳定。柔模矽墙开采时,测量垮落角大约在 $31.0^{\circ}\sim 86.9^{\circ}$ 范围内,倾角演化更为复杂。

4)矽墙支撑时,上覆岩层作用力直接作用在直接顶与矽墙岩层铰接处,矽墙强度高,在夹角处未破碎让压,岩层整体发生旋转,铰接结构利于侧向支撑压力传递,对矽墙留巷支护不利;留煤柱开采时,由于煤柱比较松软,支撑能力弱,上覆岩层旋转时煤柱破碎,岩层未能铰接于煤柱夹角处,整体表现为剪切滑落,减少了侧向支撑压力的传递,对巷道稳定有利。

参考文献

- [1] Hebblewhite B. Fracturing, caving propagation and influence of mining on groundwater above longwall panels: a review of predictive models[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 30(1): 49-54.
- [2] Rošer J, Potočnik D, Vulić M. Analysis of dynamic surface subsidence at the underground coal mining site in velenje, Slovenia through modified sigmoidal function[J]. *Minerals*, 2018, 8(2): 74.
- [3] Vinay L S, Bhattacharjee R M, Ghosh N, et al. Numerical study of stability of coal Pillars under the influence of line of extraction[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 1556-1570.
- [4] 余伊河, 马立强, 张东升, 等. 长壁工作面采动覆岩层理开裂机理及侧向裂隙发育规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(S2): 527-541.
Yu Y H, Ma L Q, Zhang D S, et al. Cracking mechanism and lateral crack development law of overlying strata in longwall working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S2): 527-541. (in Chinese)
- [5] 高永格, 张强, 牛鑫, 等. 沿空留巷顶板覆岩二次采动裂隙实测分析[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(3): 78-84.
Gao Y G, Zhang Q, Niu C, et al. Analysis of actual measurement of cracks in overlying rock on roof of gob-side entry retaining during secondary mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 78-84. (in Chinese)
- [6] 王婉洁, 高富强. 工作面覆岩采动裂隙演化规律物理及数值模拟研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(2): 17-26.
Wang W J, Gao F Q. Study of the evolution of mining-induced fractures with longwall face proceeds-insight from physical and numerical modeling[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(2): 17-26. (in Chinese)
- [7] Zhang X M, Wang J C, Feng D, et al. Development law of overlying strata's broken fissure based on bored imaging by big data analysis[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 4703.
- [8] 梁冰, 石占山. 深部开采条件下相似材料模拟实验加载力学边界研究[C]// 中国力学大会-2015论文摘要集. 上海: 中国力学学会, 上海交通大学, 2015: 293.
Liang B, Shi Z S. Study on loading mechanical boundaries of similar materials simulation experiments under deep mining conditions[C]// The Chinese Congress of Theoretical and Applied Mechanics(CCTAM 2015). Shanghai: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, 2015: 293. (in Chinese)

- [9] 李宏艳,王维华,齐庆新,等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1023-1030.
Li H Y, Wang W H, Qi Q X, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1023-1030. (in Chinese)
- [10] 苗磊刚,石必明,穆朝民,等. 大采高采动覆岩变形的相似模拟试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 116-121.
Miao L G, Shi B M, Mu C M, et al. Similar material simulation study on deformation behavior of overlying strata in great mining height face[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 116-121. (in Chinese)
- [11] 林海飞,刘思博,双海清,等. 沿空留巷开采覆岩裂隙演化规律及卸压瓦斯抽采技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 52-64.
Lin H F, Liu S B, Shuang H Q, et al. Overburden rock fracture evolution law and pressure relief gas extraction technology of gob-side entry retaining mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 52-64. (in Chinese)
- [12] 何满潮. 无煤柱自成巷开采理论与110工法[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 869-881.
He M C. Theory and engineering practice for non-pillars mining with automagical entry formation and 110 mining method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 869-881. (in Chinese)
- [13] Bian W H, Yang J, He M C, et al. Research and application of mechanical models for the whole process of 110 mining method roof structural movement[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(9): 3106-3124.
- [14] Wang E Y, Chen X D, Yang X J. Research and application of an innovative 110 mining method in gob-side half coal rock entry retaining[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 8228604.
- [15] Chen D C, Wang X Y, Wu S, et al. Study on stability mechanism and control techniques of surrounding rock in gob-side entry retaining with flexible formwork concrete wall[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(9): 2966-2982.
- [16] Zhu D Y, Wang J, Gong W L, et al. Model test and numerical study on surrounding rock deformation and overburden strata movement law of gob-side entry retaining via roof cutting[J]. Minerals, 2020, 10(5): 458.
- [17] Zhang J G, Wang W, Li Y H, et al. Fracture distribution characteristics in goaf and prevention and control of spontaneous combustion of remained coal under the influence of gob-side entry retaining roadway[J]. Energies, 2022, 15(13): 4778.
- [18] 杨俊彩,王文,张广杰. 柔模砼墙沿空留巷围岩变形规律及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 89-99.
Yang J C, Wang W, Zhang G J. Study on deformation law and control technology of surrounding rock in gob-side entry retaining with flexible concrete wall[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 89-99. (in Chinese)

(编辑 郑洁)