



综放开采覆岩变形分区和矿压显现模拟研究

翟新献 郭钊洋 方建厂 张志勇 赵晓凡

引用本文：

翟新献, 郭钊洋, 方建厂, 等. 综放开采覆岩变形分区和矿压显现模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 96–106.
ZHAI Xinxian, GUO Zhaoyang, FANG Jianchang. Study on deformation zoning of overlying strata and simulation of rock pressure behavior in longwall top coal caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 96–106.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0991>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特厚煤层综放开采邻空动压巷道围岩变形机理及卸压控制

Mechanism of deformation and pressure relief control of dynamic gob-side entry surroundings in fully-mechanized caving mining for extra-thick coal seam

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 83–94 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1810>

特厚坚硬煤层超大采高综放首采面智能化技术研究

Intelligent technology of first-mining face of longwall top-coal caving with super large cutting height in extra-thick and hard coal seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2fe3ab74-49b5-4248-9513-f9d00d28bb2a>

厚煤层综放开采顶煤分区破坏特征研究

Study on zone failure characteristics of top-coal in fully-mechanized top-coal caving mining of thick coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 99–107 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/224915c1-0d0a-4e20-8d0d-e2672868a647>

浅埋双向倾斜工作面综放开采矿压显现规律研究

Study on ground pressure behavior law of fully-mechanized top-coal caving mining in shallow buried two-way inclined working face

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 53–60 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b0d2143e-4062-4e5a-b8e3-3b72cbda97b9>

冲击地压矿井近距离特厚煤层综放工作面合理推进速度研究

Study on reasonable advancing speed of fully-mechanized top-coal caving face in mining contigous extra-thick coal seams in rockburst mine

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 287–297 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0729>

厚煤层大采高综放工作面覆岩断裂演化规律研究

Study on evolution law of overburden fracture in fully-mechanized top-coal caving face with large mining height in thick coal seam

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 1–12 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1926>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

翟新献, 郭钊洋, 方建厂, 等. 综放开采覆岩变形分区和矿压显现模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(1): 96–106.

Zhai Xinxian, GUO Zhaoyang, FANG Jianchang, et al. Study on deformation zoning of overlying strata and simulation of rock pressure behavior in longwall top coal caving mining[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 96–106.

综放开采覆岩变形分区和矿压显现模拟研究

翟新献^{1,2}, 郭钊洋¹, 方建厂³, 张志勇³, 赵晓凡¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南省煤矿岩层控制国际联合实验室, 河南 焦作 454003;

3. 河南大有能源股份有限公司千秋煤矿, 河南 三门峡 472300)

摘要: 目前综放开采是我国特厚煤层安全高效矿井主要的采煤方法, 综放开采上覆岩层变形移动规律, 直接影响到工作面矿压显现、液压支架选型、放顶煤工艺和参数选择等问题。以耿村煤矿13200综放工作面为工程背景, 利用相似模拟试验和理论分析, 研究了综放工作面上覆岩层变形移动垮落全过程、覆岩变形分区和矿压显现特征。结果表明: ①确定出综放工作面上覆存在多层关键层岩层即下位、中位、上位和主关键层。依据关键层垮落失稳特征, 将综放开采上覆岩层变形移动全过程划分为4个变形阶段(I、II、III、IV), 各变形阶段与不同层位的关键层垮落失稳有关。②综放开采下位关键层垮落失稳以后, 随着工作面推进度继续增加, 处于裂隙带内的中位、上位和主关键层先后垮落失稳前与其下部岩层出现离层; 关键层垮落失稳前, 在其下部岩层中形成垮落拱, 垮落拱的高度和宽度均与工作面推进度成正相关。③综放工作面上覆各关键层垮落失稳引起超前支承压力的峰值应力集中系数升高; 当下位关键层垮落失稳时, 工作面出现“大周期来压”现象, 来压步距较大, 但来压强度较低; 当中位、上位、主关键层垮落时, 将引起下位关键层同时垮落, 工作面出现“小周期来压”现象, 工作面来压步距较小, 但来压强度较高。研究结果为耿村煤矿缓倾斜特厚煤层综放开采提供理论基础和技术支撑。

关键词: 特厚煤层; 综放开采; 关键层; 垮落拱; 超前支承压力

中图分类号: TD325 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)01-0096-11

Study on deformation zoning of overlying strata and simulation of rock pressure behavior in longwall top coal caving mining

Zhai Xinxian^{1,2}, GUO Zhaoyang¹, FANG Jianchang³, ZHANG Zhiyong³, ZHAO Xiaofan¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Coalmine Ground Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. Henan Dayou Energy Co., Ltd., Sanmenxia 472300, China)

Abstract: At present, longwall top coal caving (LTCC) mining is main mining method for safety and efficiency mines with extremely-thick coal seam in China. However, the deformation movement law of overlying strata on LTCC face directly affects rock pressure behavior of LTCC face, selection of hydraulic supports, and selection of top coal caving technique and parameters, etc. Based on the engineering background on LTCC face 13200 in Gengcun Coal Mine, using similar simulation test and theoretical analysis, the paper studied the whole process of deformation, movement and caving of overlying strata, their deformation zoning, and the characteristics of rock pressure behavior of LTCC face. The results show that: ① It is determined that there are multi-layer key strata on LTCC face, i.e., the lower, middle, upper and main key strata. According to the collapse instability characteristics of key strata in different layers, the whole process of deformation movement of overlying strata on LTCC face is divided into four deformation stages. Each deformation stage is related to the collapse instability of key stratum in different layers. ② After the collapse instability of the lower key strata in LTCC mining, with the continuous increase of LTCC face advancement, the middle, upper and main key strata in the fractured zone have separated from their lower strata be-

fore the collapse instability. Before the collapse of the key strata, the collapse arch is formed in its lower strata, and the height and width of the collapse arch are positively correlated with LTCC face advancing distance. ③ The collapse instability of each key stratum on LTCC face directly causes the peak stress concentration factor K_{\max} of the front abutment pressure to increase. When the lower key stratum collapses and loses stability, the phenomenon of large periodic weighting occurs on LTCC face, the weighting interval is larger, but the weighting strength is lower; the collapse of the middle and upper key strata or the main key stratum will cause the lower key stratum to collapse at the same time, and the phenomenon of small periodic weighting occurs on LTCC face. The weighting interval is smaller, but the weighting strength is higher. The research conclusions provide theoretical basis and technical supporting for LTCC face with the gently-inclined and extremely-thick coal seam in Gengcun Coal Mine.

Key words: extremely-thick coal seam; longwall top coal caving (LTCC) mining; key stratum; caving arch; front abutment pressure

0 引言

综合机械化放顶煤开采技术(简称综放开采)实现了特厚煤层一次采全高,已经成为我国特厚煤层安全高效矿井主要的采煤方法^[1-2]。钱鸣高院士等^[3-4]建立的“砌体梁”理论和关键层理论,指导我国煤矿采场矿山压力与岩层控制研究,在采场矿压控制、覆岩裂隙分布、采动应力分布、岩层移动等方面取得了一些重要成果;汪北方等^[5]建立了采空区岩体应力空间分布数学模型,分析了采空区底板应力分布特征,得到垮落带岩体应力沿煤层走向呈“U”形分布;戴文琦^[6]采用理论分析和现场实测,研究了采空区底板垂直应力动态演化规律,得出采空区底板垂直应力呈类抛物线分布;王文学等^[7]建立了煤层开采空间演化模型,推导出采空区底板岩体应力恢复与时间、空间的函数表达式;鞠金峰等^[8]基于关键层理论研究了厚煤层开采覆岩运移规律,随工作面推进度增加,覆岩呈5个阶段典型运移特征,探究了关键层破断对地表沉陷的影响规律;许家林等^[9]通过现场实测、理论分析和模拟试验方法,研究了厚煤层开采上覆关键层结构变化特征及其对工作面矿压显现的影响,构建了关键层结构状态支架工作阻力计算力学模型,分析了不同关键层破断结构形态对工作面支架工作阻力的影响,并进行了现场实测验证;张少华等^[10]采用数值模拟分析了单层关键层岩层位置、厚度等因素,对超前支承压力影响范围和峰值应力的影响;付宝杰等^[11]研究了相邻关键层组合运动对矿压显现的影响,认为相邻两关键层的复合效应造成工作面周期来压出现大、小周期性变化;原富珍等^[12]研究了多层关键层和采高对工作面超前支承压力的影响,当采高大于3 m时,低位关键层主要影响到峰值支承压力与工作面煤壁之间的距离,而中位关键层主要影响峰值支承压力的大小;金珠鹏等^[13]研究了采深、采高对工作面超前支承压力的影响,结果表明,工作面采高和顶板结构是超前支承

压力的主要影响因素。

国内许多学者们对义马矿区特厚煤层综放开采覆岩运移规律和应力演化特征进行了大量研究^[14-18],然而特厚煤层综放开采以后,工作面上覆岩层变形移动破坏与传统的中、厚煤层开采在“竖三带”和“横三区”矿压理论存在差异;深部综放工作面覆岩存在不同层位的多层关键层岩层时,覆岩中各关键层变形移动垮落过程,特别是主关键层的垮落失稳对放顶煤工作面来压、采空区底板应力恢复程度,以及超前支承压力分布等有待深入研究。笔者以耿村煤矿13200综放工作面为工程背景,采用相似模拟和理论分析,研究综放工作面回采过程中多层关键层垮落失稳特征和超前支承压力分布特征等,以期为深部特厚煤层综放工作面围岩控制提供理论基础和技术支撑。

1 综放工作面概况

耿村煤矿13200综放工作面采用走向长壁综采放顶煤开采,图1为综放工作面布置平面。该工作面位于耿村井田13采区;北侧为13180综放工作面采空区,南侧为未回采的13220综放工作面。综放工作面长度249 m,走向推进长度719 m。工作面回采2-3煤层,煤层含多层夹矸,结构复杂;煤层倾角8°~12°,煤层厚度10.4~16.6 m,平均厚度14.0 m,属于缓倾斜特厚煤层。工作面地面标高+608~+642 m,最大采深623 m。工作面直接顶为厚度16.0 m的泥岩和砂质泥岩;基本顶为厚度19.0 m的细粒砂岩;2-3煤层顶板上方273 m存在厚度约335 m的巨厚砾岩岩层。工作面直接底为厚度2.8 m的炭质泥岩(煤矸互层);基本底为厚度大于35 m的泥岩、砂岩互层。

2 相似模拟试验过程

2.1 物理相似模型的建立

以耿村煤矿13200综放工作面为原型,沿工作

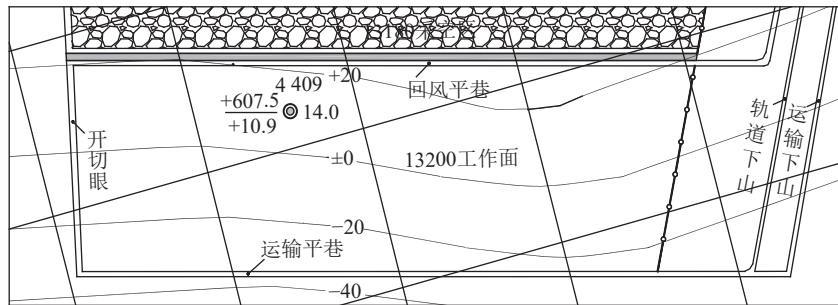


图1 13200综放工作面布置平面

Fig.1 Layout plan of longwall top coal caving face 13200

面中部走向方向取地质剖面进行相似模拟试验。模型煤岩层选用细河沙为骨料,石膏和碳酸钙为胶结料,以硼砂为缓凝剂,煤岩层界面、层理选用云母薄

层进行模拟。经相似材料配比试验后,确定出物理力学性质不同的煤岩层相似材料的骨料、胶结料的配比,见表1。

表1 原型和相似模型煤岩层物理力学参数及其相似材料配比

Table 1 Physico-mechanical parameters and similar material ratios of coal and strata for prototype and similar model

序号	原型				相似模型		关键层性质 (层位符号)
	岩层岩性	岩层厚度/m	单轴抗压强度 /MPa	容重/ $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	岩层厚度/mm	单轴抗压强度/kPa	
1	表土层	9.0	7.65	16.0	25.7	36.0	982
2	上位砾岩	200.0	43.45	27.2	571.4	99.17	473
3	泥岩	1.0	18.88	25.4	2.9	32.10	982
4	下位砾岩	120.0	43.45	27.2	285.7	99.17	473
5	泥岩	18.0	18.88	25.4	51.4	32.10	982
6	砂质砾岩	20.0	36.91	26.3	57.1	82.73	873
7	泥岩	35.0	18.88	25.4	85.7	32.10	982
8	中粒砂岩	23.0	61.28	28.0	65.7	117.81	373
9	泥岩	25.0	18.88	25.4	57.1	32.10	982
10	砂质泥岩	3.7	36.91	26.3	10.7	82.73	873
11	2-1煤层	1.3	18.75	13.1	3.5	31.86	982
12	泥岩	5.0	18.88	25.4	14.3	32.10	982
13	细粒砂岩	19.0	61.28	26.0	54.3	134.17	755
14	泥岩	5.0	18.88	25.1	14.3	32.10	982
15	砂质泥岩	6.0	36.91	26.3	17.1	82.73	873
16	泥岩	5.0	18.98	25.4	14.3	32.10	982
17	2-3煤层	14.0	18.75	13.1	40.0	31.86	982
18	泥岩	10.0	18.88	25.1	28.6	32.10	982
19	细粒砂岩	10.0	61.28	26.0	57.1	134.17	755

依据13230综放工作面综合柱状图中煤层上覆各岩层厚度、容重、弹性模量等参数,利用关键层理论,确定出2-3煤层综放开采时上覆岩层中存在的多层关键层岩层的层位^[15,19],即下位关键层1(基本顶简称KS₁)、中位关键层2(KS₂)、上位关键层3(KS₃)、主关键层(KS₄),依次为煤层顶板细粒砂岩层(层厚19.0m)、中粒砂岩层(23.0m)、下位砾岩层(120.0m)和上位砾岩层(200.0m),其弹性模量依次

为26.80、30.70、32.00、34.25 GPa。

采用平面应力相似模型,模型外形尺寸:长度×宽度×高度为2500 mm×200 mm×1500 mm。根据相似原理确定、计算出模型的主要相似常数。选用模型与原型的几何相似常数C_L=1:350.0,计算出时间相似常数C_t=1:18.708,容重相似常数C_γ=1:1.758,应力相似常数C_σ=C_LC_γ=1:615.3。

为消除2-3煤层回采过程中边界效应对煤层

上覆岩层变形移动的影响,在模型两侧各留设300 mm宽度的边界保护煤柱。相似模型如图2所示。模拟煤层回采方向为从左向右侧方向连续进行,在模型左侧开切巷一侧留设固定煤柱,模拟工作面推进度为1900 mm,在模型右侧留设保护煤柱。

现场特厚煤层采用综放开采,因此模拟厚煤层实行一次采全高放顶煤开采。模拟试验期间连续回采,模拟煤层每间隔30 min回采一次,回采步距60 mm;相当于现场综放工作面推进速度达到53.88 m/d,这

样可以保证测试一架试验模拟需要2~3 d,从而缩短了试验总时间。

事实上,模拟试验放顶煤工作面推进速度,直接影响到上覆岩层下沉速度,各关键层的垮落失稳产生的动载荷对下部工作面煤柱、煤体影响较大;而对各关键层最终下沉量、采空区、煤柱、煤体上的静载荷等影响较小。因此每次模拟工作面回采步距时,工作面覆岩顶板稳定以后,观测得到关键层垮落拱参数、煤柱和采空区垂直应力分布规律等结论,适用于耿村煤矿现场综放工作面。

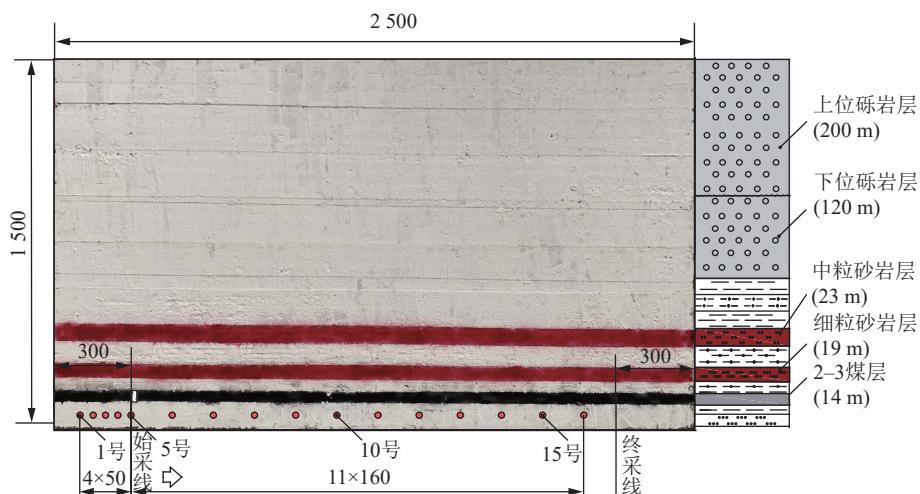


图2 相似模型和2-3煤层底板压力传感器布置

Fig.2 Similar model and layout of the pressure sensors into coal seam floor

2.2 模拟试验时模型观测

为了观测模拟煤层开采时采场围岩应力分布特征,在模拟煤层底板20 mm的直接底岩层,依次布设BX-1型压力传感器。编号为1~5号、间距50 mm的传感器,位于开切巷侧煤柱底板;而编号为6~16号、间距160 mm的传感器,位于拟开采区域的煤层直接底岩层。共铺设16个压力传感器,实时观测模拟放顶煤工作面回采过程中工作面前方煤体底板、采空区底板以及开切巷侧煤柱底板的垂直应力。

为便于直观观测各关键层变形移动和失稳垮落显现规律,将模型中2-3煤层用黑色表示,下位细粒砂岩关键层和中位中粒砂岩关键层均用红色显示。相似模型及其2-3煤层底板压力传感器布置如图2所示。

3 相似模拟试验结果与分析

3.1 综放开采各关键层变形垮落和采空区底板垂直应力演化规律

特厚煤层放顶煤开采过程中,综放工作面上覆

岩层自下而上逐层发生变形移动直至垮落。依据综放工作面上覆不同层位关键层垮落失稳前后特征,将特厚煤层放顶煤开采过程中上覆岩层变形移动垮落全过程划分为4个变形阶段,即下位关键层垮落变形阶段I、中位关键层垮落变形阶段II、上位关键层垮落变形阶段III,以及主关键层垮落变形阶段IV。随着工作面推进度增加,覆岩不同变形阶段时采空区底板应力由缓慢增加到快速突变递增,最终趋于稳定状态。不同变形阶段时综放工作面覆岩变形垮落和采空区底板应力演化特征如图3所示。

1) 变形阶段I。综放工作面推进度 L 为0~105.5 m,覆岩变形处于下位关键层(KS_1)垮落变形阶段。

从开切巷开始,随着工作面推进度增加,直接顶(泥岩、砂质泥岩、泥岩)岩层强度较低、层理发育,自下往上直接顶分层垮落以后,堆积在采空区底板上,形成垮落带。

当综放工作面推进度为105.5 m时,达到下位关键层(基本顶)的极限跨距时,关键层发生初次垮落。

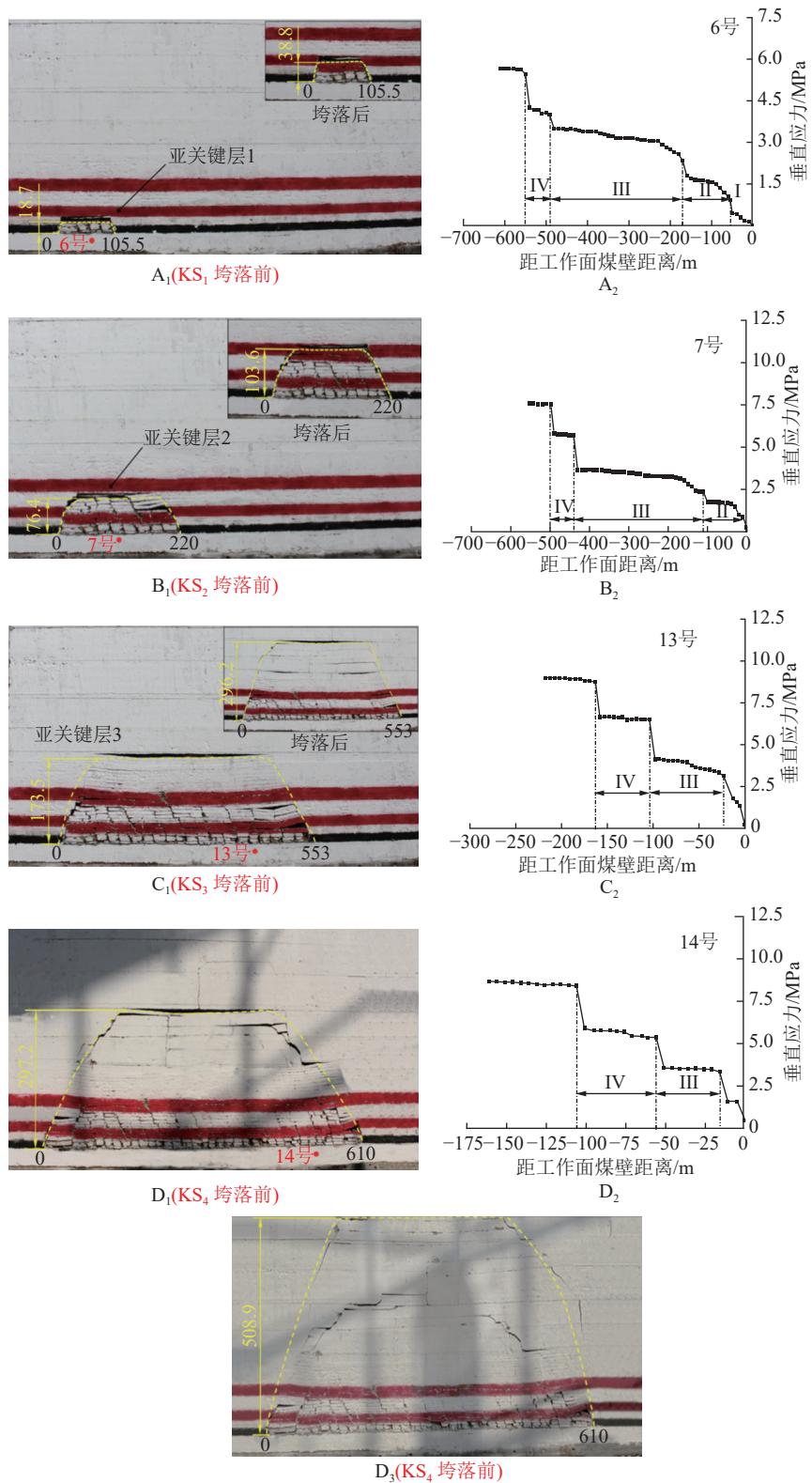


图3 不同变形阶段时工作面覆岩变形垮落和采空区底板应力演化特征

Fig.3 Evolution characteristics of overlying strata deformation caving and gob floor stress at different deformation stages of LTCC face

关键层垮落前与采空区垮落带岩层顶面之间出现高度9.7 m的离层空间。该阶段形成垮落拱的跨度和高度分别为105.0 m和38.8 m, 崩落带岩层初始厚度

35.0 m, 则垮落带岩层碎胀系数 K_p 为1.11, 如图3(A₁)所示。

变形阶段I采空区底板6号压力传感器的垂直

应力曲线如图3(A₂)所示。下位关键层垮落前测点垂直应力缓慢增加到0.408 MPa, 该值为垮落直接顶自重应力; 崩落后垂直应力突然增大到0.893 MPa, 该值为垮落直接顶和基本顶岩层理论自重应力的99.9%。

2) 变形阶段II。综放工作面推进度L为105.5~220.0 m, 覆岩变形处于中位关键层垮落变形阶段。

当下位关键层发生初次垮落后的, 随着综放工作的继续推进, 关键层上覆裂隙带岩层即泥岩层、2-1煤层、砂质泥岩和泥岩层等软弱岩层, 自下而上依次发生弯曲下沉、变形破坏直至垮落。垮落岩层的区间和高度逐渐增加。

当工作面推进度达到220 m时, 达到中位关键层的极限跨距时, 关键层发生初次垮落。垮落前与下部规则垮落带岩层顶面出现的离层量和离层区间达到最大值, 分别为7.6 m和130.1 m。直接顶垮落后高度为18.7 m, 碎胀系数为1.17。形成垮落拱的跨度和高度分别为220.0 m和103.6 m, 崩落岩层初始厚度93.0 m, 则垮落岩层碎胀系数为1.11, 如图3(B₁)所示。

变形阶段II采空区底板7号压力传感器垂直应力曲线如图3(B₂)所示。在变形阶段II中位关键层垮落前, 随着推进度增加, 采空区底板垂直应力缓慢增大, 中位关键层垮落前垂直应力为0.893~1.736 MPa; 当中位关键层垮落前垂直应力突然增加到2.351 MPa, 该值为垮落岩层自重应力的99.2%。

3) 变形阶段III。综放工作面推进度为220.0~553.0 m, 覆岩变形处于上位关键层垮落阶段。

当中位关键层发生初次垮落以后, 随着工作面继续推进, 中位关键层上覆的泥岩、砂质泥岩和泥岩层相继发生变形移动和垮落, 崩落带高度逐渐向上扩展, 且崩落范围不断扩大。中位关键层与下部规则垮落带岩层顶面发生离层; 随着工作面继续推进, 离层量和离层区间逐渐增大和增宽。

当工作面推进度达到553 m时, 上位关键层垮落前与下部垮落岩层的最大离层量达到6.5 m, 最大离层区间377.8 m; 形成的垮落拱的跨度和高度分别为553 m和296.2 m。垮落岩层初始厚度287 m, 则垮落岩层碎胀系数为1.03, 如图3(C₁)所示。

变形阶段III采空区底板13号压力传感器的垂直应力曲线如图3(C₂)所示。上位关键层垮落前随着推进度增加, 采空区底板垂直应力缓慢增加到4.051 MPa, 崩落后突变增加到6.620 MPa, 该值为垮落岩层自重应力的90.4%。

4) 变形阶段IV。综放工作面推进度为553~610 m, 覆岩变形处于主关键层垮落阶段。

上位关键层垮落后的, 随着工作面推进度继续增加, 主关键层的离层量和离层范围均逐渐增加; 当工作面推进度为610 m时, 主关键层发生初次垮落。之后, 随着工作面推进度的增加, 直到工作面回采结束后, 覆岩垮落整体形态为中间低两边高, 呈马鞍形, 采空区垮落岩层呈对称分布; 形成的垮落拱的跨度和高度分别为610 m和508.9 m, 如图3(D₁)所示。

变形阶段IV采空区底板14号压力盒垂直应力变化曲线如图3(D₂)所示。主关键层垮落前测点垂直应力为5.37~5.89 MPa; 当主关键层垮落后的, 测点垂直应力突变增加到8.40 MPa, 该值仅为垮落岩层自重应力的67.6%, 说明主关键层垮落不充分。

此外, 工作面推进过程中, 采空区底板8号、9号、10号、11号、12号压力传感器, 随着工作面推进度增加, 采空区底板测点垂直应力曲线呈阶梯式递增, 阶梯内垂直应力缓慢增加; 当关键层垮落失稳时测点垂直应力突变增加, 各测点垂直应力变化规律如图4所示, 变形阶段II 8号压力盒垂直应力范围为0.893~2.354 MPa。变形阶段III上位关键层垮落后的, 采空区底板最大垂直应力为5.985~6.714 MPa, 该值为垮落岩层自重应力的81.8%~91.7%。变形阶段IV主关键层垮落后的, 采空区底板最大垂直应力为8.490~9.346 MPa, 该值为垮落岩层自重应力的64.5%~71.0%。之后, 随着推进度增加, 各测点垂直应力基本保持恒定。

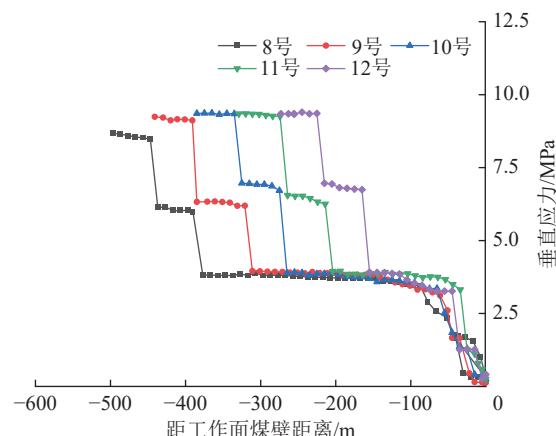


图4 测点垂直应力与其距工作面煤壁距离之间关系

Fig.4 Relationship between vertical stress at measurement points and their distances from the coal face rib

当综放工作面回采结束、覆岩垮落稳定后, 采空区底板垂直应力曲线基本呈梯形对称分布, 如图5所示。工作面回采结束主关键层垮落, 覆岩呈大块

体状整体下沉后,采空区中部底板岩层的垂直应力基本保持恒定,其中最大垂直应力为9.358 MPa,该值为原岩垂直应力的71.0%,表明采空区底板最大应力恢复不到原岩应力。由于固定煤柱和工作面前方煤体上覆关键层形成的砌体梁结构,限制其上覆岩层的垮落,造成煤柱、煤体承受较高应力作用,采空区两侧底板处于较低应力区,该区域采空区底板测点的最小垂直应力为6.856 MPa,仅为原岩垂直应力的52.0%,且长期处于低应力区。

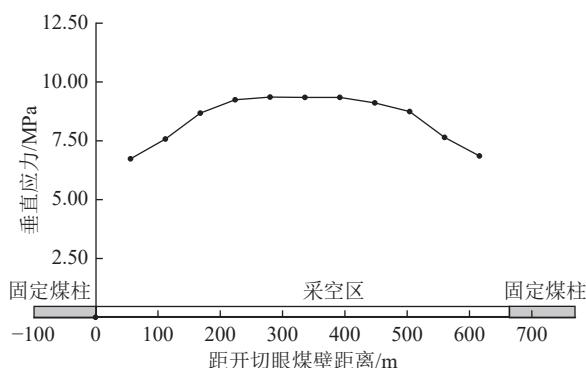


图5 回采结束后采空区底板测点垂直应力分布

Fig.5 Vertical stress distribution of measuring points on gob floor after the completion of LTCC mining

3.2 覆岩垮落拱变形扩展演化规律

综放工作面自开切巷向停采线位置回采过程中,随着推进距离(推进度)逐渐增大,煤层上覆自下而上各岩层逐渐变形、下沉、垮落,导致下位、中位、上位关键层,以及主关键层依次垮落。综放开采垮落带高度升高,处于裂隙带内的中位和上位关键层垮落前与下部岩层出现离层,因此在不同变形阶段(I、II、III、IV)工作面上覆岩层中出现不同的垮落拱,垮落拱一端为开切巷煤体,另一端为工作面前方煤体;主关键层垮落拱内下部岩层处于规则、非充分垮落状态。垮落拱形态时空演化特征如图6所示。

随着推进度增加,覆岩垮落拱不断向工作面推进方向扩展,垮落拱呈“类梯形”对称分布,垮落拱的跨度和高度逐渐增宽和增高,但垮落拱内岩层碎涨系数逐渐变小。不同变形阶段覆岩垮落拱的基本参数见表2。特厚煤层综放开采过程中,覆岩垮落拱高度与工作面推进度和垮落拱两侧拱的倾角有关,即:

$$H = f(L, \theta_1, \theta_2) \quad (1)$$

式中: H 为垮落拱高度,m; L 为工作面推进度,m; θ_1 和 θ_2 分别为开切巷侧和工作面前方煤体侧垮落拱倾角,近似为顶板岩层垮落角,(°)。

根据特厚煤层开采过程中覆岩垮落拱时空演化特征见表2,经过回归分析得到垮落拱高度与工作面

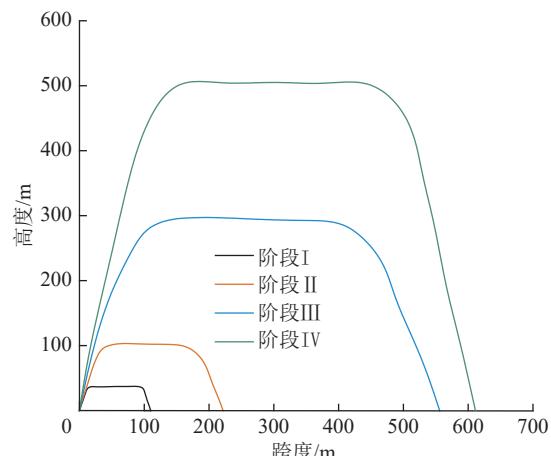


图6 崩落拱形态时空演化特征

Fig.6 Space-time evolution characteristics of caving arch shape

表2 不同变形阶段覆岩垮落拱参数

Table 2 Parameters of caving arches of overlying strata in different deformation stages

变形阶段	跨度/m	高度/m	开切巷侧垮落角/(°)	工作面前方煤体侧垮落角/(°)
I	105.5	38.8	71	69
II	220.0	103.6	71	70
III	553.0	296.2	73	72
IV	610.0	508.9	74	73
均值(均方差)		72.3(1.5)		71.0(1.8)

推进度和垮落拱倾角之间的函数关系为

$$H = C_1 L^{C_2(\theta_1 + \theta_2)}, R^2 = 0.91950 \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 分别为常数, $C_1 = 0.00520$, $C_2 = 0.01236$ 。

义马矿区耿村煤矿综放工作面上覆不同层位岩层的厚度和岩性一定,垮落拱两侧的倾角 θ_1 和 θ_2 均为定值,因此耿村煤矿特厚煤层开采过程中,各关键层垮落前形成垮落拱的高度与工作面推进度呈正相关指数关系,随着工作面推进度增加,垮落拱高度向上递增。

3.3 超前支承压力和煤柱支承压力特征

3.3.1 综放工作面超前支承压力

特厚煤层综放工作面开采过程中,上覆岩层中形成砌体梁结构,随着工作面推进,砌体梁结构不断发生运移,关键块出现下沉、回转、垮落,将砌体梁岩层及其上方随动岩层的重量向工作面前(后)方煤体中转移,在工作面前方煤体出现超前支承压力,在工作面后方煤柱出现固定支承压力。超前支承压力特征可以用峰值应力集中系数、峰值应力位置距煤壁距离、超前支承压力影响范围 L 等参数来表示^[18-19]。

依据综放工作面回采期间,不同观测站底板压

力传感器(1~16号)观测结果,得到工作面超前支承压力分布曲线和分布特征,如图7和表3所示。工作面超前支承压力分布曲线呈“单峰型”。工作面煤壁前方煤体,随着距煤壁距离增加,支承压力单调增加,达到峰值后,随着距煤壁距离的增加,支承压力单调递减,逐渐趋于原岩应力的稳定状态,垂直应力基本保持不变。试验结果表明,工作面煤层底板原岩垂直应力为13.172 MPa;超前支承压力 L_0 影响范围为98.4~106.5 m,均值为103.1 m;峰值应力距煤壁距离 x_0 为23.0~27.5 m,均值为26.4 m。

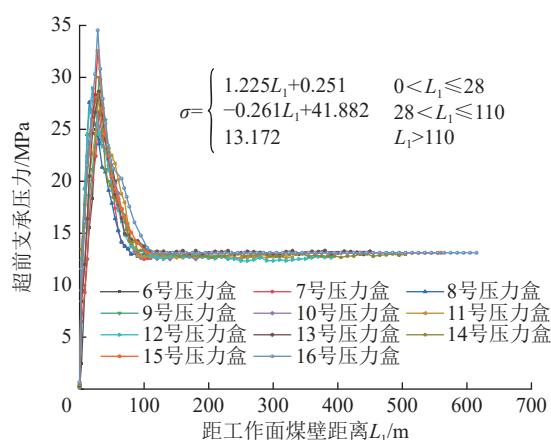


图7 不同观测站超前支承压力分布曲线

Fig.7 Distribution curves of the front abutment pressure in different observation stations

表3 不同观测站超前支承压力参数

Table 3 Characteristics of the front abutment pressure in different observation stations

压力传感器编号	L_0 /m	x_0 /m	K_{\max}
6	>56.0	23.0	1.87
7	98.4	23.2	2.25
8	101.3	27.0	2.06
9	99.2	26.3	2.38
10	102.5	26.4	2.06
11	101.5	27.0	2.06
12	103.7	27.1	2.08
13	106.2	27.3	2.16
14	105.6	27.5	2.13
15	106.5	27.7	2.68
16	106.2	27.5	2.60

依据图7中各测点数值,经过回归拟合分析,得到特厚煤层放顶煤开采过程中,工作面超前支承压力与其距煤壁距离之间的关系,即:

$$\sigma = \begin{cases} 1.225L_1 + 0.251 & 0 < L_1 \leq 28 \\ -0.261L_1 + 41.882 & 28 < L_1 \leq 110 \\ 13.172 & L_1 > 110 \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ 为工作面超前支承压力, MPa; L_1 为工作面超前支承压力位置与煤壁之间距离, m。

耿村煤矿综放工作面现场矿压观测表明^[20-23],在采深、采高以及顶板围岩性质一定时,综放工作面超前支承压力与工作面推进度有关;随着工作面推进度增加,超前支承压力峰值应力集中系数逐渐增大,并趋于定值;受中、上位关键层和主关键层的影响,工作面动载系数、周期来压步距等来压参数会时常发生变化。当工作面正常回采期间,超前支承压力分布处于较稳定状态。所以,耿村煤矿综放工作面现场矿压观测结果,较好地验证了模拟试验得到工作面超前支承压力计算式(3)正确性。

3.3.2 固定煤柱支承压力

当综放工作面推进度不同时,开切巷侧固定煤柱支承压力演化规律,如图8所示。煤柱峰值支承压力距开切巷侧煤壁35.0 m。煤柱测点支承压力与其距煤壁距离和工作面推进度 L 有关。当 $L=50.0$ m时,基本顶未垮落,煤柱底板应力为原岩应力13.172 MPa。当工作面推进度依次为100、200、300、400、500 m时,煤柱底板峰值应力集中系数 K_{\max} 分别为1.87、1.94、1.99、2.06、2.18,随着推进度增加,煤柱底板 K_{\max} 逐渐增大。当工作面推进度达到600~665 m,下位、中位和上位关键层先后垮落,主关键层固定煤柱层间距最大,主关键层垮落失稳对固定煤柱影响较小,煤柱底板最大应力稳定在29.90 MPa, K_{\max} 为2.27,说明主关键层垮落失稳对煤柱载荷影响较小。

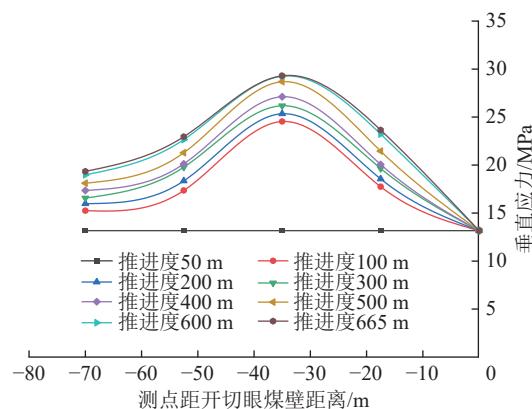


图8 不同推进度时煤柱底板支承压力演化特征

Fig.8 Evolution characteristics of the abutment pressure of coal pillar floor under different advancing distances

3.4 不同层位关键层间相互作用关系

3.4.1 关键层垮落失稳对工作面前方煤体的作用

综放工作面上覆岩层中存在不同层位的4层关键层岩层,各关键层岩层厚度、岩性和岩层结构、裂

隙发育程度以及层位不同,造成各关键层垮落步距不同、垮落失稳后对工作面前方煤体的冲击作用不同,导致工作面超前支承压力应力集中系数 K_{\max} 发生变化,如图9所示。

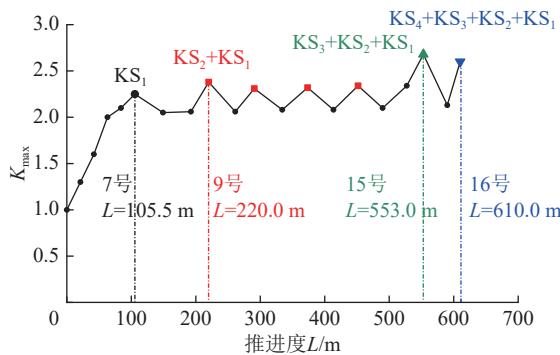


图9 工作面前方峰值应力集中系数 K_{\max} 与推进度关系

Fig.9 Peak stress concentration factor K_{\max} in the front of LTCC face vs. its advancing distance

在关键层 KS_1 未垮落前($L<105.5$ m),工作面处于初次来压阶段,随着工作面推进度增加,超前支承压力逐渐增加,应力集中系数持续升高;当基本顶初次来压时工作面前方 K_{\max} 增加到极大值2.25。之后,工作面处于正常回采阶段,工作面超前支承压力处于稳定状态,主要体现在工作面前方 K_{\max} 与工作面推进度有关,呈“下降-稳定-上升”状态,变化幅度

较小。但当工作面中位关键层发生垮落时,有可能诱发下位关键层 KS_1 同时垮落,导致工作面前方应力集中系数升高。当 $L=220.0$ m时,中位关键层 KS_2 垮落时造成下位关键层 KS_1 同时垮落,工作面前方 K_{\max} 增大到极大值2.38,该值为 KS_1 初次来压时 K_{\max} 的106%。当 $L=553.0$ m时,上位关键层 KS_3 垮落,诱发中位 KS_2 和下位 KS_1 关键层同时垮落,工作面前方 K_{\max} 达到极大值2.68。当 $L=610.0$ m时,主关键层 KS_4 垮落,造成上、中、下关键层 KS_3 、 KS_2 、 KS_1 同时垮落,此时工作面前方 K_{\max} 为2.60。此外,下位关键层的垮落将引起工作面出现周期来压显现,周期来压步距相等或相近,但当中、上位关键层或主关键层垮落时,将诱发工作面出现小周期来压显现,周期来压步距较小。

3.4.2 上位关键层垮落失稳对下位关键层的影响

随着特厚煤层回采,各关键层岩层自下而上依次发生垮落失稳,关键层垮落失稳时将对工作面前方煤岩体产生冲击动压,造成工作面前方回采巷道有可能出现冲击地压显现。当煤层上覆存在多层关键层时,上位关键层垮落失稳将首先引起下位关键层承受的载荷应力升高,同时工作面超前支承压力增加,前方峰值应力集中系数 K_{\max} 增大。表4为工作面回采过程中不同关键层垮落失稳特征。

表4 不同层位关键层来压参数和来压时峰值应力集中系数 K_{\max}

Table 4 Weighting pressure parameters and the peak stress concentration factor K_{\max} of the key strata in different layers

推进度/m	KS_1		KS_2		KS_3		KS_4		K_{\max}	关键层 层位
	N_i	L_i /m								
105.5	初次来压	105.5							2.25	
149.2	1	43.7							2.05	
192.5	2	42.3							2.06	KS_1
220.0	3	27.5	初次来压	220.0					2.38	KS_2+KS_1
261.3	4	41.3							2.06	KS_1
290.8	5	29.5	1	70.8					2.31	KS_2+KS_1
334.1	6	43.3							2.08	KS_1
373.5	7	39.4	2	82.7					2.32	KS_2+KS_1
413.6	8	40.1							2.08	KS_1
451.7	9	38.1	3	78.2					2.34	KS_2+KS_1
489.8	10	37.5							2.10	KS_1
527.3	11	25.7	4	76.5					2.34	KS_2+KS_1
553.0	12	21.2	5	25.7	初次来压	553.0			2.68	$KS_3+KS_2+KS_1$
590.1	13	37.1							2.13	KS_1
610.0	14	20.0	6	57.0	1	57.0	初次来压	610.0	2.60	$KS_4+KS_3+KS_2+KS_1$

注: i 表示 KS_1 关键层第*i*次周期来压; K_{\max} 表示来压时工作面前方煤层底板峰值应力集中系数。

现场综放工作面来压强度通常用采煤时工作面支架载荷系数来表示。对于相似模拟综放工作面来压强度, 引用顶板来压时工作面前方煤层底板峰值应力集中系数 K_{\max} 表示, K_{\max} 越大, 工作面来压强度越高, 反之, 来压强度越低。由表 4 可知, 单层关键层 KS_1 岩层垮落失稳时, 初次来压步距为 105.5 m, 来压时 $K_{\max} = 2.25$ 。当工作面推进度 $L = 0 \sim 610.0$ m 回采期间, 工作面出现了 7 次(第 1、第 2、第 4、第 6、第 8、第 10、第 13 次)单层关键层垮落失稳时工作面周期来压现象, 周期来压步距为 37.1 ~ 43.7 m, 均值为 40.8 m, 来压步距较大, 属于工作面“大周期来压”来压现象。但大周期来压期间来压强度较低, 来压时工作面前方煤层底板峰值应力集中系数 K_{\max} 为 2.05 ~ 2.13, 均值 2.08。当中位关键层 KS_2 岩层垮落失稳时, 该关键层垮落步距为 70.8 ~ 82.7 m, 均值 77.5 m; 中位关键层 KS_2 崩落失稳将造成下位关键层 KS_1 同步崩落, 工作面来压步距减小, 但来压强度增加, 工作面出现“小周期来压”来压现象。当中位关键层 KS_2 发生初次崩落时与 KS_1 同步崩落, 此时工作面第 3 次周期来压步距仅 27.5 m, 而来压时 K_{\max} 为 2.38, 该值为工作面周期来压时 K_{\max} 均值的 1.14 倍; KS_2 发生周期崩落时导致下位 KS_1 发生同步崩落, 当工作面推进度分别为 290.8、373.5、451.7、527.3 m 时, 工作面出现第 5、第 7、第 9、第 11 次小周期来压现象, 来压步距依次为 29.5、39.4、38.1、25.7 m, 均值为 33.18 m, 该值为工作面大周期来压时来压步距均值的 81.3%; 但小周期来压时 K_{\max} 分别为 2.31、2.32、2.34、2.34, 均值为 2.33, 该值为工作面大周期来压时 K_{\max} 均值的 112.0%。

当 $L = 553.0$ m 时, KS_3 发生初次崩落失稳, 导致中位 KS_2 和下位 KS_1 关键层提前发生崩落, 主要表现为工作面第 12 次周期来压步距减小到 21.2 m, 但来压时 $K_{\max} = 2.68$, 该值为工作面大周期来压时 K_{\max} 均值的 1.29 倍。

当 $L = 610.0$ m 时, 主关键层 KS_4 发生初次崩落失稳, 造成下部上位、中位和下位关键层同时发生崩落, 第 14 次周期来压步距减小到 20.0 m, 但来压时 K_{\max} 为 2.60, 该值为工作面大周期来压时 K_{\max} 均值的 1.25 倍, 工作面出现小周期来压现象。

4 结 论

1) 相似模拟得到了特厚煤层综放工作面开采过程中上覆岩层变形移动崩落全过程。确定出综放工作面上覆存在多层关键层岩层, 即下位、中位、上位

和主关键层。依据多层关键层岩层崩落失稳特征, 将综放工作面上覆岩层变形移动崩落全过程划分为 4 个变形阶段。

2) 综放开采下位关键层崩落失稳以后, 随着工作面推进度继续增加, 处于裂隙带内的中位、上位和主关键层先后崩落失稳前, 均与其下部岩层出现离层, 并在其下部岩层中形成崩落拱, 崩落拱的高度和宽度均与工作面推进度成正相关。

3) 综放工作面上覆不同层位关键层的崩落失稳, 将直接影响到工作面矿压显现。提出了工作面前方煤层底板峰值应力集中系数 K_{\max} 用来表示工作面来压强度。当下位关键层崩落失稳时, 工作面出现“大周期来压”现象, 主要表现为顶板来压步距较大, 但来压强度较低; 当中位、上位关键层、主关键层崩落时会引起下位关键层同时崩落, 造成工作面顶板来压步距较小, 但来压强度较高, 工作面出现“小周期来压”现象。

参考文献(References):

- [1] 王家臣, 许家林, 杨胜利, 等. 煤矿采场岩层运动与控制研究进展: 纪念钱鸣高院士“砌体梁”理论 40 年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 80–94.
WANG Jiachen, XU Jialin, YANG Shengli, et al. Development of strata movement and its control in underground mining: In memory of 40 years of Voussoir Beam Theory proposed by Academician Minggao Qian[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 80–94.
- [2] 王家臣. 我国综放开采 40 年及展望[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 83–99.
WANG Jiachen. 40 years development and prospect of longwall top coal caving in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 83–99.
- [3] 于雷, 闫少宏. 特厚煤层综放开采顶板运动形式及矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 40–44, 59.
YU Lei, YAN Shaohong. Study on roof movement form and mine strata pressure law of fully-mechanized top coal caving mining in ultra thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 40–44, 59.
- [4] 于斌, 朱卫兵, 高瑞, 等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 571–580.
YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its effect mechanism of large space stope for fullymechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571–580.
- [5] 汪北方, 梁冰, 张晶, 等. 浅埋煤层采空区岩体应力空间分布特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1203–1212.
WANG Beifang, LIANG Bing, ZHANG Jing, et al. Spatial distribution characteristics of rock stress in shallow buried goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1203–1212.
- [6] 戴文琦. 相邻综采工作面采空区覆岩压力分布特征研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 195–200.

- DAI Wenqi. Pressure distribution characteristics of overlying strata in adjacent fully mechanized mining face[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 195–200.
- [7] 王文学,王四巍,刘海宁,等.采后覆岩裂隙岩体应力恢复的时空特征[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1): 127–133.
- WANG Wenxue, WANG Siwei, LIU Haining, et al. The space and time characteristics of the cover stress re-establishment of the fractured rock mass in the goaf after coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 127–133.
- [8] 鞠金峰,许家林,刘阳军,等.关键层运动监测及岩移5阶段规律:以红庆河煤矿为例[J].煤炭学报,2022,47(2): 611–622.
- JU Jinfeng, XU Jialin, LIU Yangjun, et al. Key strata movement monitoring during underground coal mining and its 5-stage movement law inversion: A case study in Hongqinghe Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 611–622.
- [9] 许家林,鞠金峰.特大采高综采关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8): 1547–1556.
- XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1547–1556.
- [10] 张少华,张玉臣,刘一鸣.典型关键层结构下覆岩采动应力分布规律研究[J].工矿自动化,2019,45(12): 50–53.
- ZHANG Shaohua, ZHANG Yuchen, LIU Yiming. Research on mining stress distribution law of overburden under typical key strata structure[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 50–53.
- [11] 付宝杰,高明中,涂敏,等.关键层的复合效应及其对矿压显现的影响[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2): 220–225.
- FU Baojie, GAO Mingzhong, TU Min, et al. Composite effect of key stratum and its influence on strata behaviors[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 220–225.
- [12] 原富珍,马克,唐春安,等.多关键层结构下不同采厚覆岩移动及围岩响应特征[J].煤炭科学技术,2022,50(6): 211–218.
- YUAN Fuzhen, MA Ke, TANG Chun'an, et al. Movement of overburden with different mining thickness and response characteristics of surrounding rock under multi-key layer structure[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 211–218.
- [13] 金珠鹏,秦涛,张俊文.深部大采高工作面支承压力分布特征及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2018,46(S1): 97–99, 134.
- JIN Zhupeng, QIN Tao, ZHANG Junwen. Analysis of abutment pressure distribution characteristics and influencing factors of deep mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(S1): 97–99, 134.
- [14] 左建平,孙运江,文金浩,等.岩层移动理论与力学模型及其展望[J].煤炭科学技术,2018,46(1): 1–11, 87.
- ZUO Jianping, SUN Yunjiang, WEN Jinhao, et al. Theoretical and mechanical models of rock strata movement and their prospects[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 1–11, 87.
- [15] 翟新献,赵晓凡,翟俨伟,等.综放开采上覆巨厚砾岩层离层和断裂力学模型及其应用[J].中国矿业大学学报,2023,52(2): 241–254.
- ZHAI Xinlian, ZHAO Xiaofan, ZHAI Yanwei, et al. Separation and fracturing mechanical models of overlying hugely-thick conglomerate stratum in fully mechanized caving mining and their application[J]. Journal of China University of Mining & Techno-
- logy, 2023, 52(2): 241–254.
- [16] 翟新献,赵晓凡,郭钊洋,等.综放开采上覆巨厚砾岩层变形垮落冲击相似模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(5): 1018–1030.
- ZHAI Xinlian, ZHAO Xiaofan, GUO Zhaoyang, et al. Similar simulation study on deformation and collapsing impact of overlying hugely-thick conglomerate stratum in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 1018–1030.
- [17] 翟新献,赵晓凡,涂兴子,等.放顶煤开采上覆巨厚砾岩层变形移动规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(3): 16–23.
- ZHAI Xinlian, ZHAO Xiaofan, TU Xingzi, et al. Study on the deformation movement law of hugely-thick conglomerate stratum over longwall top coal caving[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2019, 38(3): 16–23.
- [18] 薛诚,赵建峰,王港胜.东曲煤矿工作面超前支承压力分布规律研究[J].煤炭科学技术,2011,39(6): 9–11.
- XUE Cheng, ZHAO Jianfeng, WANG Gangsheng. Study on pilot roof support pressure distribution law of coal mining face in Dongqu Mine[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(6): 9–11.
- [19] 鲁岩,樊胜强,邹喜正.工作面超前支承压力分布规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2008,27(2): 184–187.
- LU Yan, FAN Shengqiang, ZOU Xizheng. Distributing law of advanced abutment pressure in working face[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, 27(2): 184–187.
- [20] 翟新献,孙乐乾,涂兴子,等.耿村煤矿综放开采覆岩移动和矿压显现规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(4): 1–8.
- ZHAI Xinlian, SUN Leqian, TU Xingzi, et al. Overlying strata movement deformation and strata pressure behavior of fully mechanized mining with sublevel caving in Gengcun coal mine[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2018, 37(4): 1–8.
- [21] 赵晓凡.耿村煤矿巨厚砾岩层下综放开采覆岩变形移动规律研究[D].焦作:河南理工大学,2019.
- ZHAO Xiaofan. Study on deformation movement law of overlying strata in fully mechanized caving mining under extremely-thick conglomerate in Gengcun Coal Mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [22] 翟新献,刘勤裕,赵晓凡,等.巨厚砾岩层下综放工作面冲击地压危险性评价和矿震发生特征分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2023,42(4): 1–10.
- ZHAI Xinlian, LIU Qinyu, ZHAO Xiaofan, et al. Coal bump risk assessment and mine earthquake occurrence characteristics analysis of fully mechanized caving face under hugely-thick conglomerate stratum[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(4): 1–10.
- [23] 孙乐乾.耿村煤矿综放开采覆岩和巨厚砾岩层运移规律研究[D].焦作:河南理工大学,2018.
- SUN Leqian. Study on deformation movement of overlying rock and extremely-thick conglomerate stratum in fully mechanized caving mining in Gengcun coal mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.