

# 特厚煤层卸压综放开采顶煤破碎及运移规律实验研究

吕华永<sup>1,2</sup>, 王兆会<sup>1,2</sup>, 唐岳松<sup>1,2</sup>, 张令非<sup>1,2</sup>, 刘飞<sup>1,2</sup>, 张亚宁<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 放顶煤开采煤炭行业工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 为了实现 20 m 以上特厚煤层的安全高效开采, 提出特厚煤层卸压综放开采技术。采用 60:1 的大比例相似模拟实验方法, 研究 20 m 以上特厚煤层卸压综放开采顶煤垮落破碎及运移特征、顶煤位移场和矢量场演化特征、支架阻力的影响等。研究表明: 卸压开采阶段, 顶煤顶板垮落空间形态呈近似梯形, 支架上方台阶状顶煤悬臂梁结构的破断和失稳具有周期效应, 上位顶煤位移 > 中位顶煤位移 > 下位顶煤位移, 基本顶初次来压后出现切顶压架事故。综放开采阶段, 短悬臂梁结构最终破碎成散体结构, 且中位顶煤的总位移大于上位顶煤。由于支架的支撑作用, 下位顶煤中产生明显的竖直裂隙, 受支架影响的顶煤厚度约为 10 cm。顶煤位移场、矢量场演化特征和实验结果一致。为我国 20 m 以上特厚煤层开采技术开发奠定了理论基础, 具有重大科学意义与应用价值。

**关键词:** 采矿工程; 特厚煤层; 卸压综放; 垮落破碎; 运移规律; 位移场及矢量场

**中图分类号:** TD 32

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2019)03 - 0476 - 11

## Experimental study on top-coal breaking and moving rules during fully mechanized top-coal caving mining in extremely thick coal seam

LYU Huayong<sup>1,2</sup>, WANG Zhaohui<sup>1,2</sup>, TANG Yuesong<sup>1,2</sup>, ZHANG Lingfei<sup>1,2</sup>, LIU Fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yaning<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Top-coal Caving Mining Research of Coal Mining Industry, China University of Mining and

Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to achieve safe and efficient underground mining of extremely thick coal seam above 20 m, a fully mechanized top-coal caving mining method after extracting the middle slice in extremely thick coal seam was creatively proposed. The similar simulation test with a large scale of 60:1 was performed to study breaking and moving characteristics of top-coal, displacement and vector fields of top-coal, and support load effects of the fully mechanized top-coal caving mining after extracting the middle slice in extremely thick coal seam above 20 m. The results show that, during the stage of pressure relief mining, the top-coal collapse shape is approximately trapezoidal, the breaking and instability of the stepped top-coal cantilever beam structure above the support have a periodic effect, the displacements of the upper, the median and the lower of the top-coal decrease in turn, and cutting top press support accident occurs after the first weighting of the main roof. During the fully mechanized top-coal caving mining stage, the short cantilever beam structure is finally broken into a loose structure and the

**收稿日期:** 2018 - 10 - 31; **修回日期:** 2018 - 11 - 28

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51674264); 国家重点研发计划(2018YFC0604501)

Supported by National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51674264) and National Key R&D Program of China(Grant No. 2018YFC0604501)

**作者简介:** 吕华永(1986 -), 男, 2013年毕业于河南理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事放顶煤与矿山压力与岩层控制方面的研究工作。E-mail: lvhuayong0616@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1276

total displacement of the median top-coal is greater than that of the upper top-coal. Due to supporting effect of the support structure, vertical cracks occur obviously in the lower top-coal, and the thickness of the top-coal affected by the support is approximately 10 cm. The evolution characteristics of the displacement and vector fields of the top-coal are in consistent with the experimental results. The research results lay a theoretical foundation for the development of mining technology of extra-thick coal seams above 20 m in China.

**Key words:** mining engineering; extremely thick coal seam; the fully mechanized top-coal caving mining after extracting the middle slice; breaking; movement rule; displacement and vector fields

## 1 引言

我国厚煤层开采是以放顶煤和大采高开采为主<sup>[1-2]</sup>, 在 12 m 以下厚煤层的开采中得到成功应用和普遍推广, 2014 年在大同塔山煤矿, 通过装备研发和技术改进, 大采高综放技术成功应用于 20 m 特厚煤层的开采, 资源回收率达到 88.9%。目前可以解决厚度 20 m 以下的特厚煤层一次采全高的高效综放开采难题, A. Vakili 等<sup>[3-5]</sup>也进行了相关研究, 总体上看, 我国的厚煤层开采技术研究与应用方面处于世界领先水平<sup>[6-7]</sup>。在放顶煤开采理论方面, 如顶煤放出规律<sup>[8-10]</sup>、支架与围岩关系<sup>[11-13]</sup>、顶煤破坏机制等<sup>[14-16]</sup>, 也处于世界前列。我国未来的煤炭主采区新疆等西部地区赋存有大量 20 m 以上特厚煤层, 由于埋藏深度等原因, 大部分这类煤层无法实现露天开采, 如何实现 20 m 以上特厚煤层安全高效的地下开采是一直没有解决的世界性难题, 国际上也没有类似的理论与技术可以借鉴。因此, 2016 年王家臣教授于《特厚煤层卸压综放开采基础研究, 51674264》国家自然科学基金中创造性地提出了特厚煤层中部卸压综放开采技术, 如图 1 所示。

将水平特厚煤层  $H_m$  分为 A, B, C 三层, 首先采用综采工艺开采 B 层(或称预采中部分层), 使厚煤层的中部卸压, C 层煤将自行垮落破碎堆积在 A 层煤上方。然后在 A 层布置综放工作面, 依靠采煤机割煤回采 A 层煤, 依靠放顶煤回收已经垮落破碎在 A 层上方的顶煤 C。这一开采技术的优点为: (1) 适用煤层强度范围大, 尤其对于坚硬裂隙不发育特厚煤层取消了爆破破碎顶煤工艺, 开采效率高、安全性好; (2) 适用煤层瓦斯含量范围大, 在采用综采工艺开采 B 分层时, 可充分释放和回收煤层瓦斯, 解决了瓦斯对后续综放开采的威胁。

现阶段对特厚煤层进行相关基础理论研究, 为未来该类煤层开采的技术开发做基础理论准备十分必要。本文基于煤岩体破坏特征, 采用相似材料模拟实验, 并以西部某矿实际开采地质条件为依托, 对卸压开采阶段顶煤垮落破碎特征及运移规律、采场边界垮落形态、顶煤位移场分布特征及支架阻力的影响、二次综放阶段采动应力作用下顶煤破碎特征及运移规律等内容进行系统的分析和研究, 进而揭示顶煤破碎的机制, 为特厚煤层卸压综放开采技术的成功应用提供理论支撑, 具有重大科学意义与应用价值。

## 2 相似材料实验设计

### 2.1 相似常数及材料配比

为了分析 20 m 以上特厚煤层卸压综放开采顶煤破碎及运移规律, 故选取西部某矿 5# 主采煤层为研究对象, 对顶煤垮落破碎特征及其支架阻力的影响、顶煤位移场分布特征及顶煤运移特征等内容进行研究, 其埋深为 579.6~524.5 m, 平均为 552 m。煤层倾角为 3°~10°, 平均为 6°。煤层平均厚度为 26 m, 普氏系数为 1.5, 属中硬煤层。煤层及顶底板主要岩石力学参数(见表 1)。

根据相似定律, 并依据西部某矿现场实际条件及实验模型情况, 确定几何相似比 60:1, 容重相

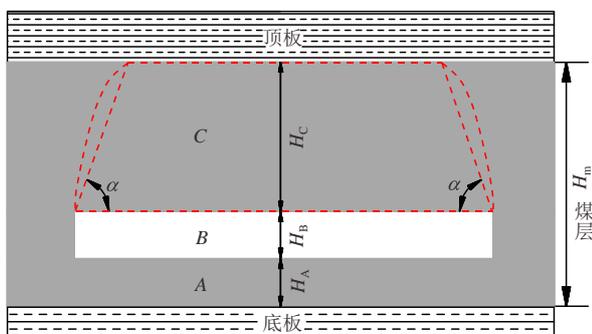


图 1 特厚煤层中部卸压综放开采技术

Fig.1 Fully mechanized top-coal caving mining after extracting the middle slice of extremely thick coal seam

表1 煤岩主要物理力学参数

Table 1 Main physico-mechanical parameters of coal and rock

| 编号 | 岩性   | 密度/(g · cm <sup>-3</sup> ) | 抗压强度/MPa |
|----|------|----------------------------|----------|
| 8  | 泥岩   | 2.42                       | 17.6     |
| 7  | 粗砂岩  | 2.41                       | 48.0     |
| 6  | 粉砂岩  | 2.53                       | 40.0     |
| 5  | 泥岩   | 2.42                       | 17.6     |
| 4  | 粉砂岩  | 2.53                       | 40.0     |
| 3  | 泥岩   | 2.42                       | 17.6     |
| 2  | 煤    | 1.45                       | 15.0     |
| 1  | 砂质泥岩 | 2.22                       | 63.0     |

似比 1.47, 应力及强度相似比 88.2。相似材料选取河砂做骨料, 以石灰、石膏作为胶结物。结合相似原理, 并经过多次配比实验, 得到模型的分层高度、材料力学性能及合理配比, 具体情况见表 2。

### 2.2 模型构建

本实验采用中国矿业大学(北京)的二维实验台, 尺寸为: 长×宽×高为 1 800 mm×160 mm×1 300 mm, 采用平面应变模型。铺设模型时对煤层底板进行简化, 本次模型铺设总高度为 1 100 mm, 模拟顶板岩层高度为 37 m, 剩余 515 m 采用配重模拟加压。实体模型铺设前在距离煤层中部卸压层上方 45.3 cm 处向上采用 5 cm×5 cm 的网格布布置 15 行 31 列位移测点, 并在边界处留设 15 cm 的保护煤柱。最后确定卸压层和综放层具体位置及卸压工作面推进方向, 煤层中部卸压层高度设计为 5 cm, 底部综放层高度设计为 5 cm。在卸压层开挖过程中, 使用自制简易液压支架(由 FPY - 101 型分离式液压千斤顶、CP - 180 型手动液压泵及顶梁等组成)监测支架

的承载特性及升降架对顶煤垮落破碎的影响, 支架顶梁尺寸为 160 mm×100 mm×10 mm(长×宽×厚), 在顶梁中部由模型背面至正面等间距依次安装 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>数据采集器, 具体模型构建情况如图 2 所示。

### 2.3 摄像与位移分析系统

摄像与位移分析系统由 2 个子系统组成: 一是可以进行实时高速高分辨率图像采集系统(见图 3); 二是基于 DIC 和 GIPS 来分析物体表面变形<sup>[17]</sup>和追踪标志点全过程位移的测量分析系统(见图 4)。

### 2.4 实验过程

确定工作面回采工序为: 升架 - 割煤 - 降架 - 移架。于模型左下方开挖卸压工作面的开切眼, 然后安装支架, 工作面每次推进约 5 cm, 共推进 22 次。由于各个系统相互联系, 在实验过程中, 严禁移动图像采集设备, 便于后期准确分析顶煤变形及破坏特征。

模型开挖前首先在模型正前方固定 GoPro HERO 5 Black 运动高速摄像机位置, 通过曲颈调节好视频拍摄角度, 随着工作面推进, 记录模型状态变化的全过程; 然后采用 GoPro Studio 软件转换视频格式并分别剪裁出 22 次回采过程, 将转换和裁剪后的视频通过 VirtualDub 软件按照每帧导出, 根据各回采期间模型的破坏情况选取若干张照片并进行时间排序; 其次采用数字散斑分析软件 DaVis 处理序列照片, 获取模型在各回采期间的累积位移场和矢量场数据, 利用 Tecplot 软件进行后处理, 获得模型的位移等值线图和矢量场, 采用 GIPS 软件追踪任意标志点的时程位移曲线; 最后对获取的以上结果进行详细的研究和分析。

表2 模型铺设分层材料用量表

Table 2 Layered material consumption of model laying

| 层号 | 岩性             | 模拟材料密度/(g · cm <sup>-3</sup> ) | 模拟抗压强度/MPa | 配比抗压强度/MPa | 分层及厚度/cm | 每分层总质量/kg | 配比号 | 每分层用砂量/kg | 每分层用灰量/kg | 每分层用膏量/kg | 每分层用水量/kg |
|----|----------------|--------------------------------|------------|------------|----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 8  | 泥岩             | 1.65                           | 0.200      | 0.210      | 10×1.92  | 9.124     | 755 | 7.983     | 0.570     | 0.570     | 1.095     |
| 7  | 粗砂岩            | 1.64                           | 0.544      | 0.536      | 5×2.34   | 11.052    | 655 | 9.473     | 0.789     | 0.789     | 1.326     |
| 6  | 粉砂岩            | 1.72                           | 0.454      | 0.462      | 5×2      | 9.908     | 655 | 8.493     | 0.708     | 0.708     | 1.189     |
| 5  | 泥岩             | 1.65                           | 0.200      | 0.210      | 2×1.65   | 7.840     | 755 | 6.860     | 0.490     | 0.490     | 0.941     |
| 4  | 粉砂岩            | 1.72                           | 0.454      | 0.462      | 5×2.5    | 12.384    | 655 | 10.616    | 0.885     | 0.885     | 1.486     |
| 3  | 泥岩             | 1.65                           | 0.200      | 0.210      | 2×2.5    | 11.880    | 755 | 10.395    | 0.743     | 0.743     | 1.426     |
| 2  | 煤 <sub>s</sub> | 0.99                           | 0.147      | 0.145      | 20×2.165 | 6.173     | 855 | 5.487     | 0.343     | 0.343     | 0.741     |
| 1  | 砂质泥岩           | 1.51                           | 0.714      | 0.723      | 2×2.5    | 10.870    | 655 | 9.317     | 0.776     | 0.776     | 1.304     |

注: 水的重量按照分层干重的 12% 计算。

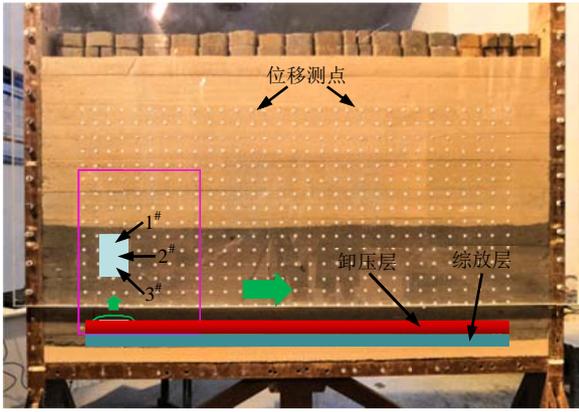
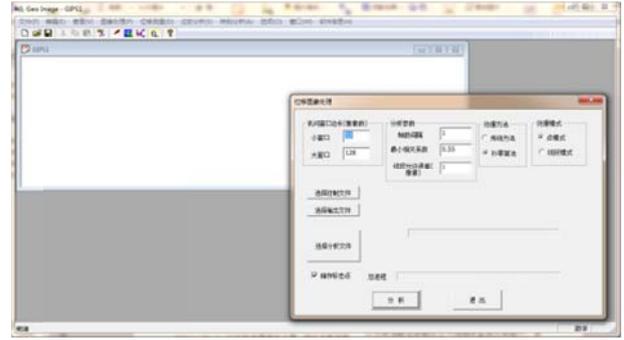


图 2 相似模拟实体模型

Fig.2 Similarly simulated solid model



(b) GPSv3.4 分析软件<sup>[17]</sup>

图 4 位移测量分析系统

Fig.4 Displacement measurement analysis system



(a) GoPro 运动摄像机

(b) Gooseneck 弯颈

图 3 图像采集系统

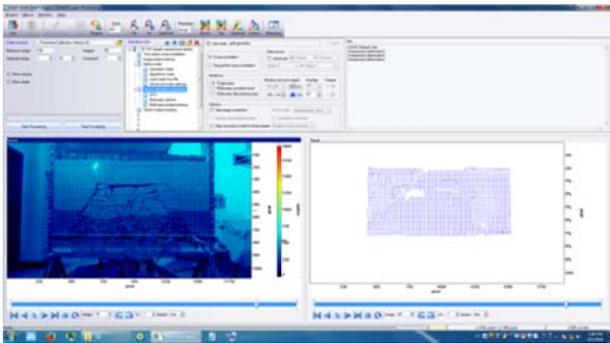
Fig.3 Image acquisition system

### 3 顶煤垮落破碎与运移规律

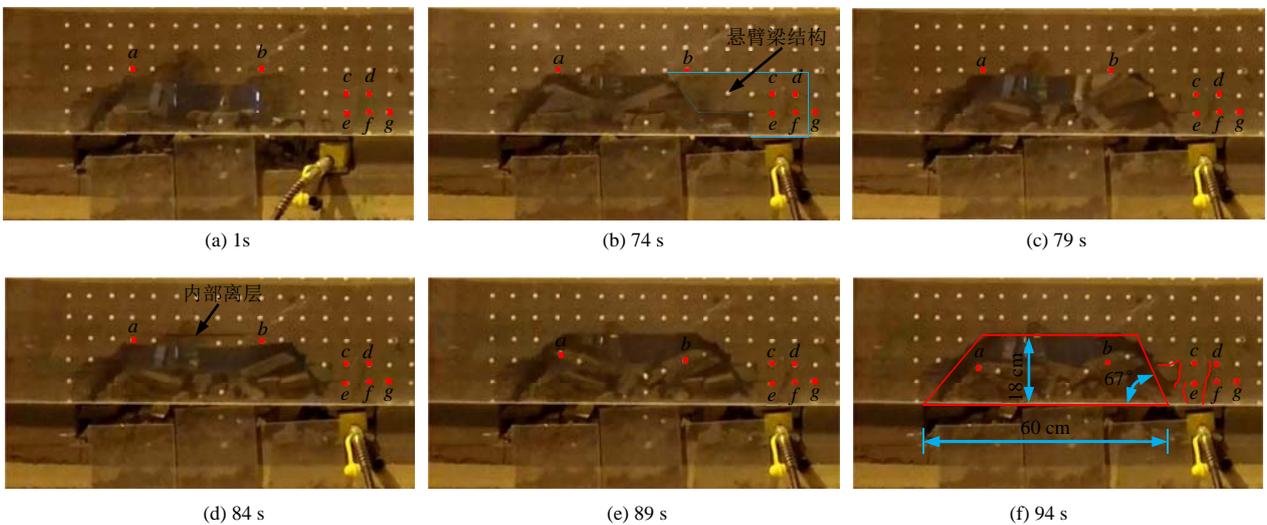
选取同一回采期间不同时刻的模型照片，在模型表面选择顶煤不同位置处的标志点，并利用 GIPS 软件追踪标志点的时程位移曲线，研究顶煤垮落破碎与运移规律，规定位移与卸压层推进方向相同为正，垂直向下为正。

#### 3.1 卸压开采阶段

图 5 为卸压工作面第 11 次回采期间顶煤的垮落破碎及运移规律。移架后，顶煤在移动支承压力和自重作用下开始垮落破碎并充填采空区，首先在标志点 *a*, *b* 下方发生离层逐渐垮落，期间支架上方台阶状顶煤悬臂梁结构发生回转失稳，直至完全切落堆积在采空区上方。最终顶煤垮落空间形态呈梯形，垮落角度为 67°，垮落高度为 18 cm，垮落长度为 60 cm，移架后下位顶煤中出现多条横向和竖向裂隙（见图 5(f)）。



(a) DaVis 8.3 分析软件



(d) 84 s

(e) 89 s

(f) 94 s

图 5 第 11 次回采期间顶煤垮落破碎及运移特征

Fig.5 Top-coal falling fragmentation and migration during the 11th mining period

图6为第11次回采期间所选7个顶煤标志点运移的时程曲线,标志点的初始状态如图5(a)所示。回采期间前80s顶煤标志点位移几乎为0,之后采空区上方标志点*b*首先发生了向下和向后的运移,即水平位移约为-4mm,垂直位移约为38mm。标志点*a*首先向前运动了3.5mm,后又反向运动了约7mm,同时向下运动了约48mm,且支架上方顶煤位移与前80s一样,基本保持不变。

图7为卸压工作面第15次回采期间顶煤的垮落破碎及运移规律。此时采空区上方顶煤已经与岩石顶板完全剥离,支架上方顶煤形成悬臂梁结构。移

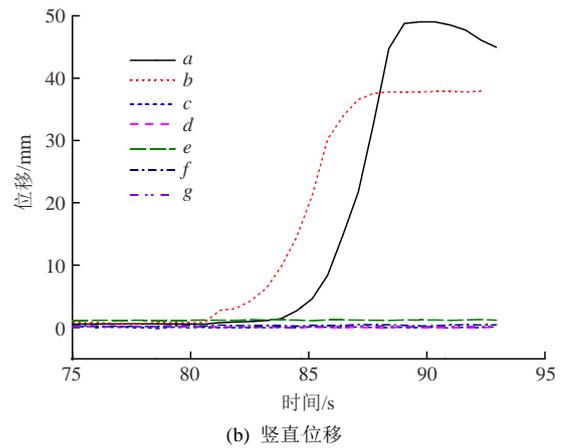
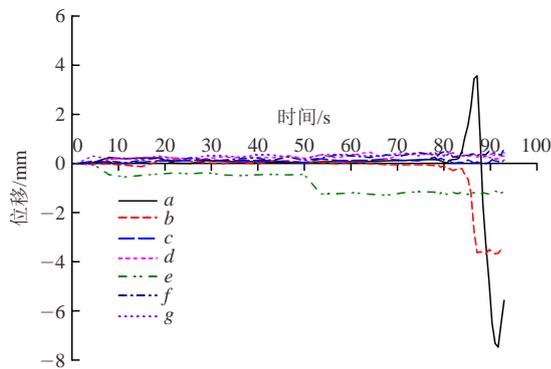


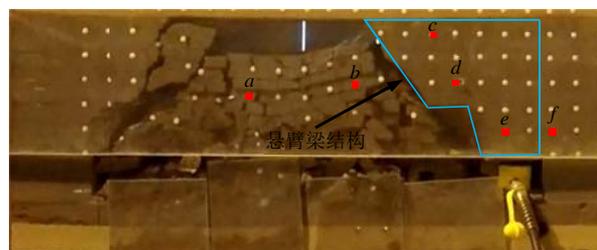
图6 第11次回采期间顶煤时程曲线

Fig.6 Top-coal time-course curves during the 11th mining period

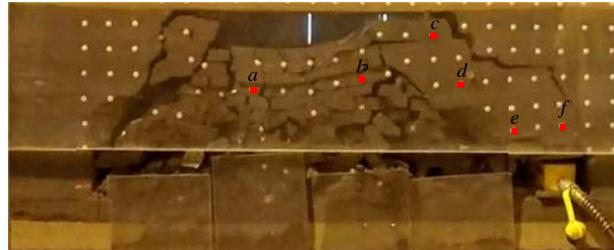


(a) 水平位移

架后,上方悬臂梁结构开始逐渐下沉,发生破断失稳,最后悬挂在采空区煤体和工作面煤壁上,形成筒支梁结构,并在支架上方形成了新的台阶状悬臂梁结构。最终顶煤垮落空间形态呈梯形,垮落高度为29cm,垮落长度为100cm,移架后下位顶煤较为破碎,出现块体剥落现象(见图7(f))。



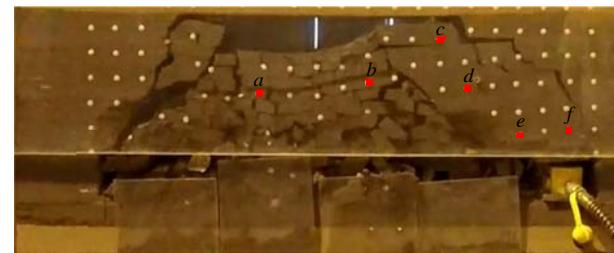
(a) 1 s



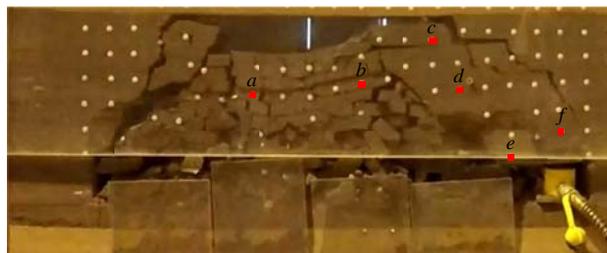
(b) 75 s



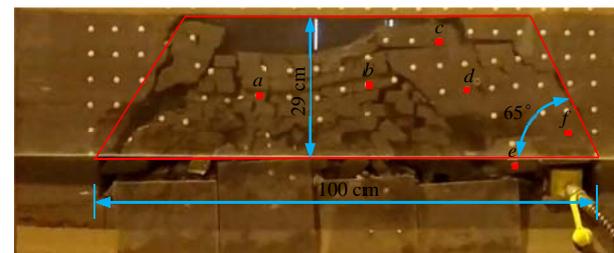
(c) 78 s



(d) 80 s



(e) 84 s

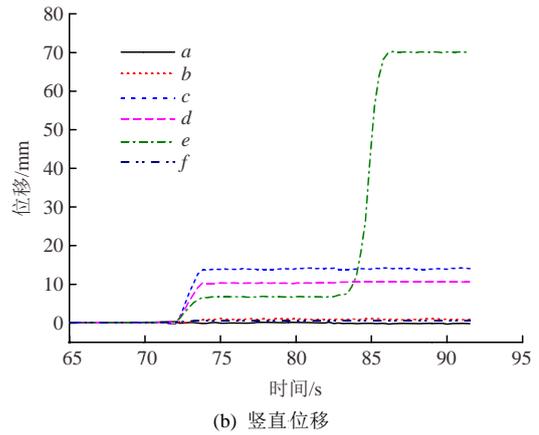


(f) 86 s

图7 第15次回采期间顶煤垮落破碎及运移特征

Fig.7 Top-coal falling fragmentation and migration during the 15th mining period

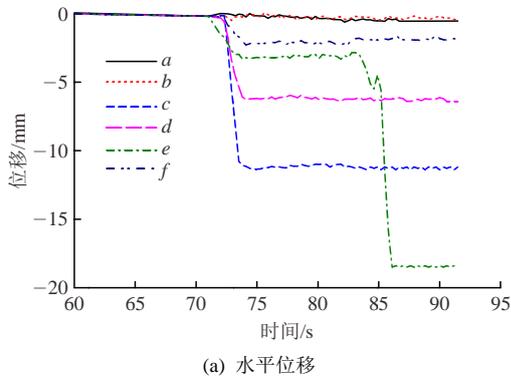
图 8 为第 15 次回采期间所选 6 个顶煤标志点运移的时程曲线, 标志点的初始状态如图 8(a) 所示。在整个回采期间, 采空区顶煤标志点 *a*, *b* 位移几乎为 0 且基本保持不变。在 72~85 s 范围, 其余标志点随垮落破碎的顶煤向采空区方向运动, 其中标志点 *c* 水平位移为 -12 mm, 垂直位移为 14 mm, 标志点 *d* 水平位移为 -7 mm, 垂直位移为 9 mm, 标志点 *e* 水平位移为 -3 mm, 垂直位移为 5 mm, 标志点 *f* 水平位移为 -1 mm, 垂直位移为 0.5 mm, 因此, 上位顶煤位移 > 中位顶煤位移 > 下位顶煤位移。在 85 s 之后, 标志点 *e* 的水平位移突然增大为 -18 mm, 垂直位移增大为 70 mm, 这是由于下位顶煤部分块体剥落造成的。



(b) 竖直位移

图 8 第 15 次回采期间顶煤时程曲线

Fig.8 Top-coal time-course curve during the 15th mining period



(a) 水平位移

图 9 为卸压工作面第 19 次回采期间顶煤的垮落破碎及运移规律。移架前, 由于支架的支撑作用, 下位顶煤破碎成块体且向后运动, 基本顶出现初次来压现象。移架后, 由于下位顶煤较为松散破碎, 造成支架上方顶煤悬臂梁结构滑落失稳, 向工作面方向运动, 出现切顶压架事故, 且移架后支架上方顶煤顶板形成组合悬臂梁结构。此时顶煤顶板垮落空间形态呈近似梯形, 垮落角度为 55°, 垮落高度为 40 cm, 垮落长度为 115 cm(见图 7(f))。

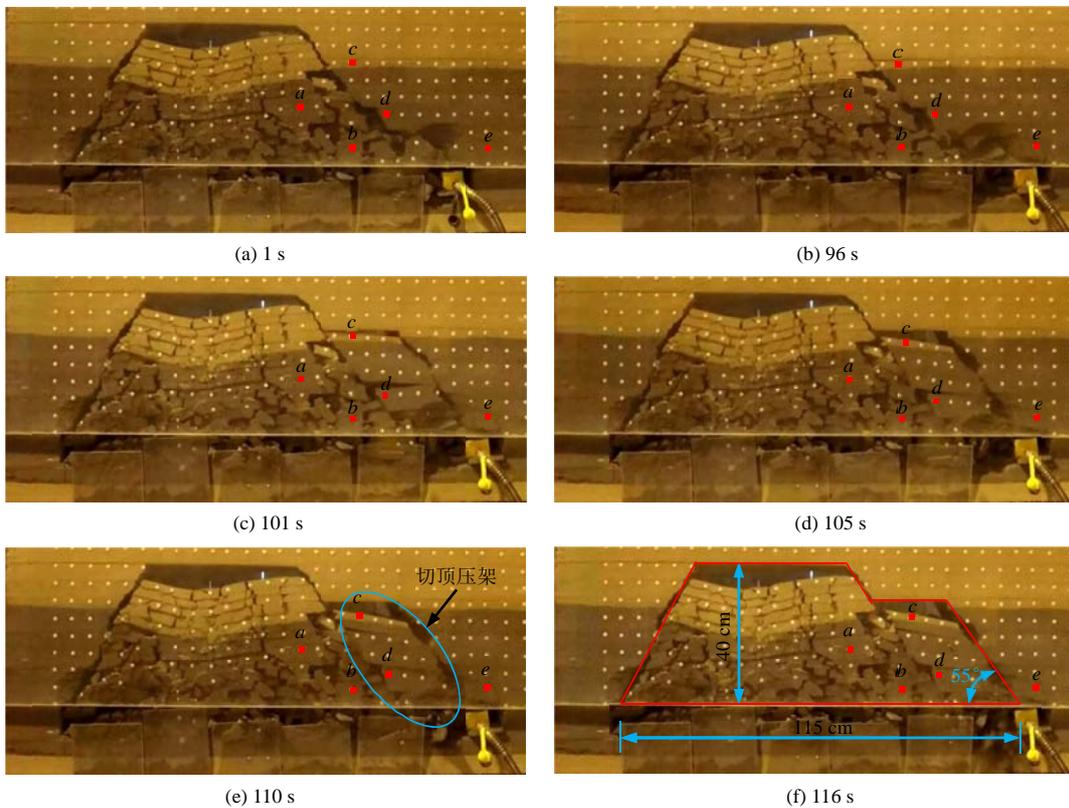


图 9 第 19 次回采期间顶煤垮落破碎及运移特征

Fig.9 Top-coal falling fragmentation and migration during the 19th mining period

图 10 为第 19 次回采期间所选 5 个顶煤标志点运移的时程曲线，标志点的初始状态如图 10(a)所示。在回采期间前 101 s，采空区顶煤标志点 *a*、*b* 点位移几乎为 0 且基本保持不变，之后由于前方悬臂梁的断裂失稳运动，标志点 *a* 的位移约为 4 mm、*b* 的位移约为 2 mm。标志点 *c*、*d* 首先向采空区运动，后向工作面运动，标志点 *c* 的水平位移约为 29 mm，垂直位移约为 33 mm，标志点 *d* 的水平位移约为 13 mm，垂直位移约为 58 mm。支架上方标志点 *e* 的位移几乎为 0，基本保持不变。

### 3.2 综放开采阶段

综放工作面由右向左推进，推进到 17 cm 时顶煤的垮落破碎及运移规律如图 11 所示，推进过程中顶煤形成短悬臂梁结构，随着综放面继续推进，短悬臂失稳断裂，破碎成较小块体(散体)随采随冒，

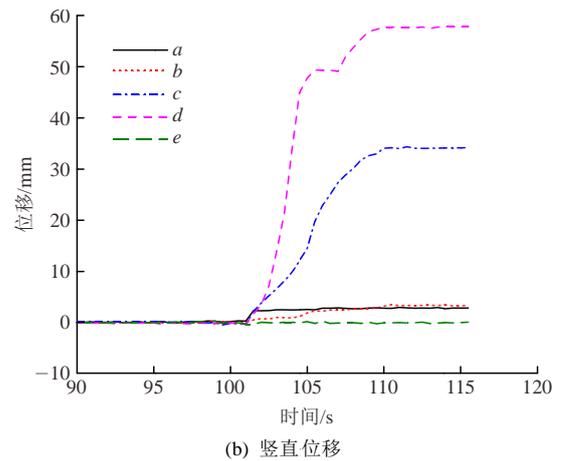
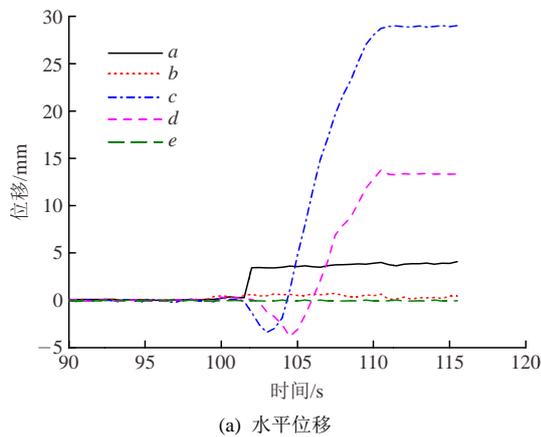


图 10 第 19 次回采期间顶煤时程曲线

Fig.10 Top-coal time-course curve during the 19th mining period

且岩石顶板也形成了短悬臂梁结构，随着综放面继续推进，与顶煤一起随采随冒，最终垮落空间形态为近似梯形，顶煤垮落角约为 90°，垮落高度为 34 cm，垮落长度为 44 cm。

如图 12 所示，在回采 12 s 之后由于短悬臂梁结构的滑落失稳标志点 *a*、*b* 开始向综放面后方运动。随着顶煤的放出，顶煤和顶板之间出现大片冒空区，标志点 *a* 在 13 s 左右开始突然向其右下方冒空区运动，且水平位移达到最大值 80 mm，此时，下位顶板中的标志点 *a* 由于所在块体较大且无自由冒落空间，无法继续向右下方运动，但随着综放面的推进转而向其左下方运动，整个运动时间持续很短，之后保持稳定，水平位移约为 55 mm，垂直位



(a) 水平位移

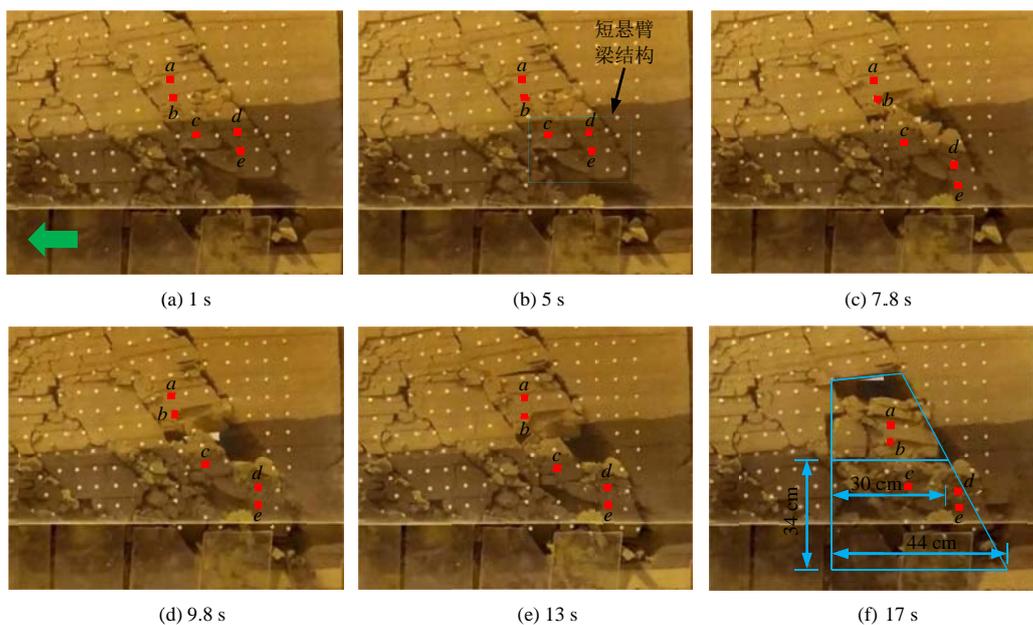
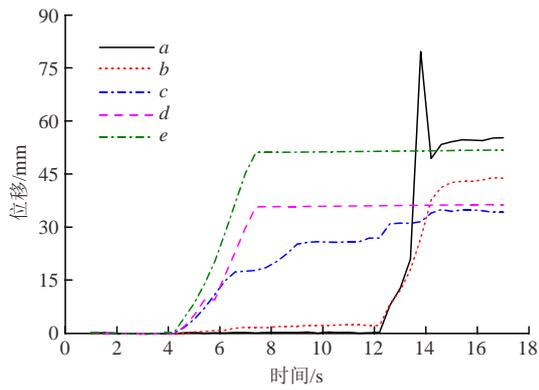
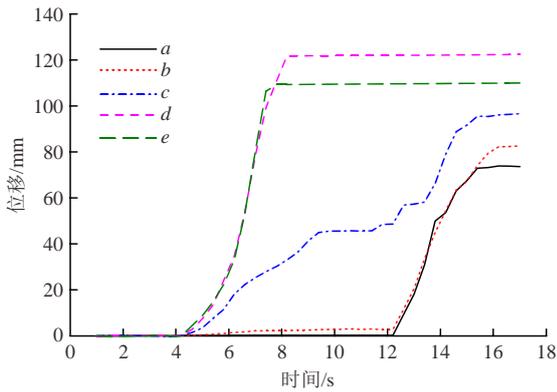


图 11 综放工作面推进 17 cm 时顶煤垮落破碎及运移特征

Fig.11 Top-coal falling fragmentation and migration when the fully mechanized caving face is advanced by 17 cm



(a) 水平位移



(b) 竖直位移

图 12 综放工作面推进 17 cm 时顶煤时程曲线

Fig.12 Top-coal time-course curve when the fully mechanized caving face is advanced by 17 cm

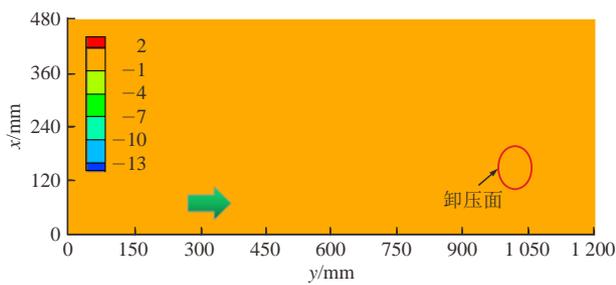
移约为 75 mm。标志点 *b* 的水平位移约为 45 mm，垂直位移约为 80 mm。标志点 *c*、*d* 和 *e* 在回采 4 s 之后开始运动，标志点 *c* 的位移逐渐增大，水平位移

约为 32 mm，垂直位移约为 95 mm。标志点 *d* 的水平位移约为 35 mm，垂直位移约为 122 mm。标志点 *e* 的水平位移约为 52 mm，垂直位移约为 115 mm。于顶煤在卸压开采阶段得到预破碎，在综放开采阶段得到进一步破碎，使得坚硬顶煤破碎成散体结构，且中位顶煤的总位移大于上位顶煤。

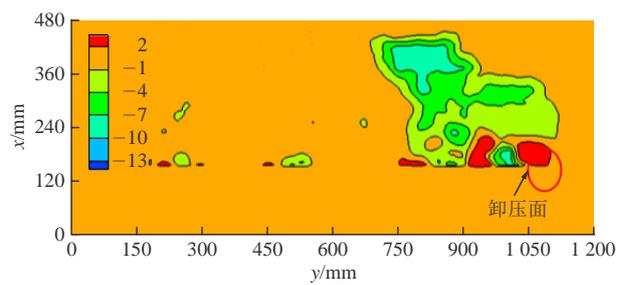
### 4 顶煤位移场与矢量场分析

卸压工作面第 11 次回采期间顶煤的位移场演化规律如图 13、14 所示，规定位移与卸压层推进方向相同为正，垂直向下为正。在回采初始阶段，顶煤位移场几乎为 0，回采到 75 s 时，由于支架上方悬臂梁的破断失稳，顶煤位移场开始逐渐扩大，且上位顶煤位移 > 中位顶煤位移 > 下位顶煤位移，但当回采到 80 s 时，由于支架左上方下位顶煤出现块体剥落现象，此区域位移场开始演化并达到最大，此时上位顶煤最大水平位移达到 -11.5 mm，最大垂直位移为 16.5 mm，中位顶煤最大水平位移达到 -5.5 mm，最大垂直位移为 11.5 mm，下位顶煤最大水平位移达到 -11.5 mm，最大垂直位移为 16.5 mm。此外，堆积在采空区的块体顶煤位移场与支架正上方下位顶煤位移场无明显变化。

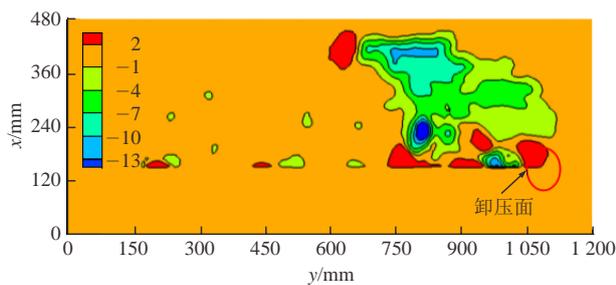
如图 15 所示，为推进到 17 cm 时顶煤位移矢量场的演化规律，参考图 11 可知，随着顶煤的放出和综放面的推进，顶煤和顶板由大块体破碎成小块体，



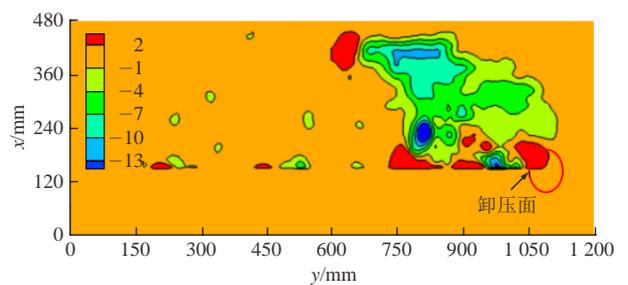
(a) 1 s



(b) 75 s



(c) 78 s



(d) 80 s

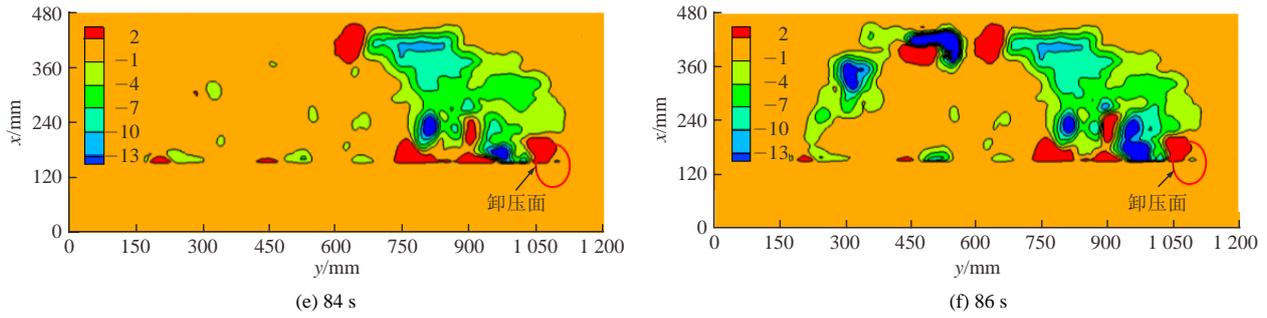


图 13 第 15 次回采期间顶煤水平位移场演化特征(单位: mm)

Fig.13 Horizontal displacement field of top-coal during the 15th mining period(unit: mm)

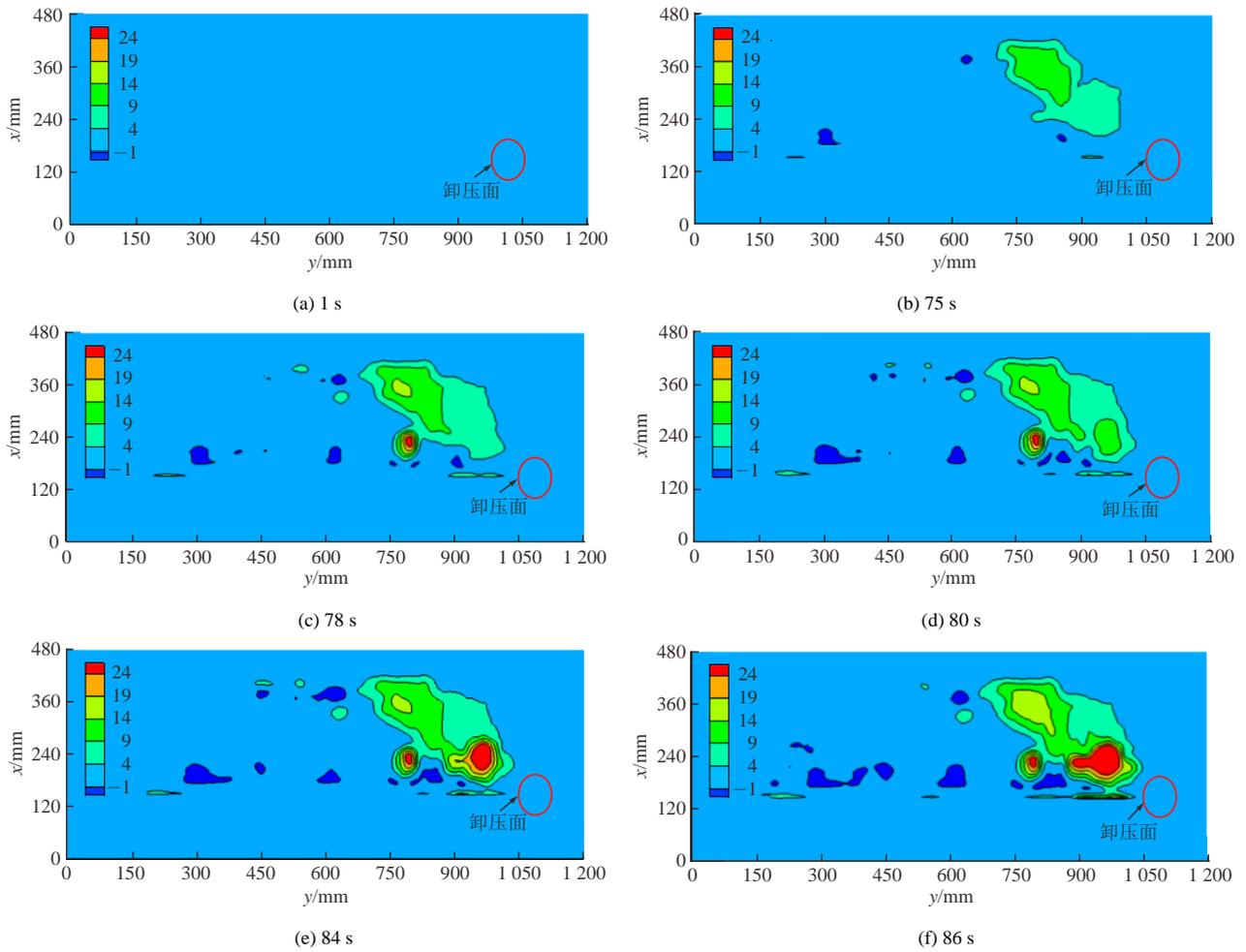
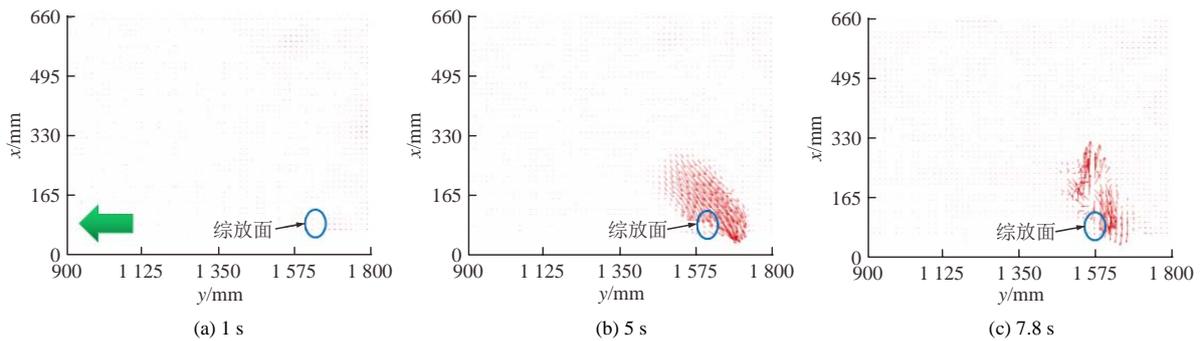


图 14 第 15 次回采期间顶煤垂直位移演化特征(单位: mm)

Fig.14 Vertical displacement field of top-coal during the 15th mining period(unit: mm)



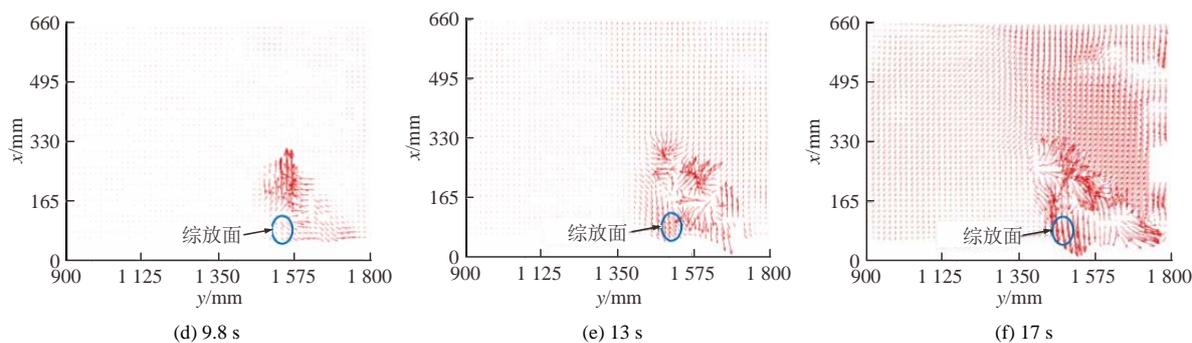


图 15 综放工作面推进 17 cm 时顶煤位移矢量场演化规律

Fig.15 Top-coal displacement vector field when the fully mechanized caving face is advanced by 17 cm

块体破碎及运移过程中发生挤压、摩擦及支顶等现象，这导致部分块体不可能发生完全的平移下降，而是可能在回采期间的某一瞬间块体发生一端下降一端上升或整体被抬升的运动，图 15 正是提取的顶煤在某一状态的位移矢量场随时间的演化规律，因此出现位移矢量场向上移动的现象。除此之外，可以看出顶煤在不同回采时刻的运移规律，且顶煤位移场集中分布在综放面右上方区域，与实验结果一致。

### 5 支架阻力的影响

如图 16 所示，当卸压工作面推进 45 cm 时，在升架阶段，支架最大阻力达到 2.4 kN，顶梁阻力分布规律为： $2^{\#}>1^{\#}>3^{\#}$ ，支架合力作用点在顶梁中部；在支撑阶段，顶梁阻力分布规律为： $1^{\#}>2^{\#}>3^{\#}$ ，支架合力作用点在顶梁左端；支架卸载后，顶梁阻力迅速降为 0。在升架阶段，由于受到支架的支撑作用，支架上方顶煤得到一定程度的破坏，下位顶煤产生了多条明显的裂隙(见图 17)。因此，支架的反复支撑作用能够促进顶煤的一次破碎效果，进而可以提高其二次破碎效果。

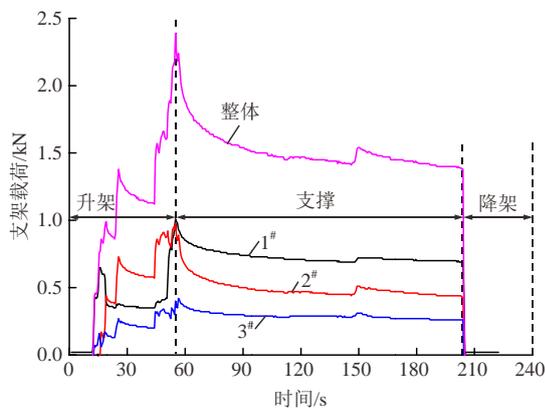


图 16 第 8 次回采期间支架阻力分布

Fig.16 Support load distribution during the 8 th mining period

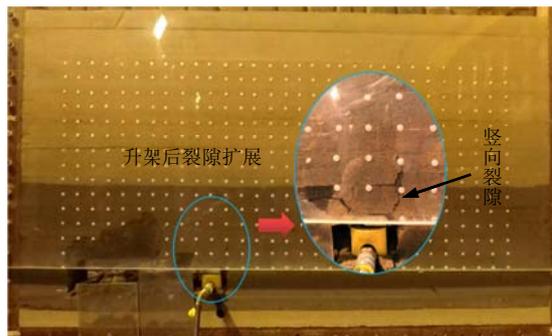


图 17 第 8 次回采期间顶煤垮落破碎特征

Fig.17 Top-coal collapse and fracture during the 8th mining period

### 6 结 论

(1) 卸压开采阶段，顶煤顶板垮落空间形态呈近似梯形，支架上方台阶状顶煤悬臂梁结构的破断和失稳具有周期效应，上位顶煤位移 > 中位顶煤位移 > 下位顶煤位移，基本顶初次来压后出现切顶压架事故。综放开采阶段，短悬臂梁结构首先破碎成较小块体结构，然后破碎成散体结构，且中位顶煤的总位移大于上位顶煤，破碎效果显著，有利于顶煤的顺利放出。

(2) 卸压工作面回采期间，初始阶段顶煤位移场几乎为 0 且变化不大，移架后期上位顶煤位移 > 中位顶煤位移 > 下位顶煤位移，堆积在采空区的块体顶煤位移场与支架正下方下位顶煤位移场无明显变化。放顶煤工作面回采期间，位移矢量场集中分布在综放面右上方区域，与实验结果一致。

(3) 由于支架的支撑作用，下位顶煤中产生明显的竖向裂隙，受支架影响的顶煤厚度约为 10 cm，支架的反复支撑作用明显促进了顶煤的破碎效果。

(4) 顶煤厚度大，会出现切顶压架事故及顶煤悬伸不垮的现象，液压支架后部支撑力可抵消顶煤和顶板破断产生的旋转作用力。事实上顶煤经过了

多次破碎, 顶煤始动点前移, 超前支承压力范围扩大, 顶煤破碎充分, 效果显著。本文提出的特厚煤层中部卸压综放开采技术在理论上是可行的, 是 20 m 以上特厚煤层开采方法创新的重要基础研究, 可科学支撑大型煤炭企业提升产能, 降低开采成本, 具有重要理论意义与实用价值。

### 参考文献(References):

- [1] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 47 - 51.(WANG Jiachen. The theory and technique on the thick coal seam mining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 47 - 51.(in Chinese))
- [2] 王家臣. 我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 43 - 51.(WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 43 - 51.(in Chinese))
- [3] VAKILI A, HEBBLEWHITE B. A new cavability assessment criterion for longwall top-coal caving[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(8): 1 317 - 1 329.
- [4] MAHDI S, CHARLIE C L. Numerical modelling of longwall mining and stability analysis of the gates in a coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 51(1): 24 - 34.
- [5] HABIB A, BRETT A P. Stress analysis of longwall top-coal caving[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(1): 30 - 41.
- [6] WANG J C. The technical progress and problems to be solved of thick coal seam mining in China[C]// Proceedings of the 30th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV, USA: [s. n.], 2011: 26 - 28.
- [7] WANG J H. Development and prospect on fully mechanized top-coal caving in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2014, 1(3): 253 - 260.
- [8] WANG J C, YANG S L, LI Y, et al. Caving mechanisms of loose top-coal in longwall top-coal caving mining method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71(1): 160 - 170.
- [9] 王家臣, 张锦旺. 综放开采顶煤放出规律的 BBR 研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 487 - 493.(WANG Jiachen, ZHANG Jinwang. BBR study of top-coal drawing law in longwall top-coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 487 - 493.(in Chinese))
- [10] 刘长友, 黄炳香. 大采高综放工作面煤矸流场规律及放煤工艺参数确定[C]// 综放开采 30 周年科技论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2012: 379 - 385.(LIU Changyou, HUANG Bingxiang. Determination of coal enthalpy flow field and coal mining process parameters in large mining height fully mechanized caving face[C]// The 30th Anniversary of Fully Mechanized Caving Mining Technology Papers. Beijing: Coal Industry Press, 2012: 379 - 385.(in Chinese))
- [11] 吴健, 张勇. 综放采场支架-围岩关系的新概念[J]. 煤炭学报, 2001, 26(4): 350 - 355.(WU Jian, ZHANG Yong. The new concept of relationship between support and surrounding-rock in longwall top-coal caving faces[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(4): 350 - 355.(in Chinese))
- [12] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连, 等. 采场支架与围岩耦合作用机制研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 40 - 44.(QIAN Minggao, MIAO Xiexing, HE Fulian, et al. Mechanism of coupling effect between supports in the working and the rocks[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 40 - 44.(in Chinese))
- [13] 伍永平, 胡博胜, 解盘石, 等. 基于支架-围岩耦合原理的模拟试验液压支架及测控系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 374 - 382.(WU Yongping, HU Bosheng, XIE Panshi, et al. Development and application of support and control system for simulating test based on the coupling principle of support-surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 374 - 382.(in Chinese))
- [14] 闫少宏, 吴健. 放顶煤开采顶煤运移实测与损伤特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 155 - 162.(YAN Shaohong, WU Jian. Analysis of top-coal movement and damage characteristics in top-coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 155 - 162.(in Chinese))
- [15] 王兆会. 综放开采顶煤破坏机制与冒放性判别方法研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.(WANG Zhaohui. Failure mechanism and cavability evaluation of top-coal in longwall Top-coal caving mining[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2017.(in Chinese))
- [16] 魏锦平, 李胜利, 靳钟铭. 综放采场顶煤压裂机制的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 178 - 1 182.(WEI Jinping, LI Shengli, JIN Zhongming. Testing study on cracking mechanism of top-coal under abutment pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 178 - 1 182.(in Chinese))
- [17] 陈冲, 吕华永, 高海南, 等. 软弱基底排土场边坡破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2 093 - 2 109.(CHEN Chong, LU Huayong, GAO Hainan, et al. Research on failure mode of slope dump on soft layer by model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2 093 - 2 109.(in Chinese))