



## 特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析

于斌 匡铁军 杨敬轩 朱卫兵

### 引用本文:

于斌, 匡铁军, 杨敬轩, 等. 特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 95–104.  
YU Bin, KUANG Tiejun, YANG Jingxuan. Analysis of overburden structure and evolution characteristics of hard roof mining in extremely thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 95–104.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1709>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测

Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock  
煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c2b9a518-fdca-4f93-9f37-99c610105dc0>

#### 多层坚硬顶板特厚煤层综放工作面小煤柱护巷技术

Small coal pillar technology in fully-mechanized top-coal caving face of multi layer hard roof and extra thick coal seam  
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 13–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0599>

#### 8.8 m 特厚煤层采场覆岩运动与应力动态演化研究

Study on overlying stratas movement and stress dynamic evolution aboveworking face in shallow buried 8.8 m extra-thick coal seam  
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 68–76 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/06f4ff13-9f63-4e3e-bc8b-23f059c8c967>

#### 多煤层开采中间岩层对覆岩移动的影响研究

Study on effect of interburden on movement of overburden in multiple coal seams  
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b56cf698-a608-4f2d-a7e7-7a4c12213e6d>

#### 分段水力压裂弱化采场坚硬顶板围岩控制技术研究

Study on surrounding rock control technology for weakened hard roof of stope by staged hydraulic fracturing  
煤炭科学技术. 2022, 50(8): 50–59 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0776b09b-df68-43fc-9911-6c9b63865d6b>

#### 高位巨厚覆岩运移规律及矿震触发机制研究

Study on movement law of extremely thick strata and triggering mechanism of mine earthquakes  
煤炭科学技术. 2023, 51(3): 10–20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1613>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

于 斌, 匡铁军, 杨敬轩, 等. 特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 95–104.

YU Bin, KUANG Tiejun, YANG Jingxuan, *et al.* Analysis of overburden structure and evolution characteristics of hard roof mining in extremely thick coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 95–104.

## 特厚煤层开采坚硬顶板覆岩结构及其演化特征分析

于 斌<sup>1</sup>, 匡铁军<sup>2</sup>, 杨敬轩<sup>3</sup>, 朱卫兵<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 资源与安全学院, 重庆 400044; 2. 晋能控股煤业集团有限公司, 山西 大同 037003;

3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 特厚煤层开采形成了大空间采场, 坚硬顶板断裂扰动波及范围广, 工作面来压具有强矿压特征, 尤其当煤层顶板“见方”开采期间, 采场矿压作用更加强烈。据此, 采用现场实测和物理三维相似模拟方法, 探讨了特厚煤层开采覆岩扰动高度及坚硬顶板断裂特征。首先基于现场实测研究分析了覆岩破断失稳规律, 实测结果表明, 特厚煤层开采过程中, 煤层顶板存在超前断裂现象。伴随工作面的推进, 顶板初始运动主要是围绕断裂线近区基点旋转下沉, 滞后工作面一定距离; 地表岩移观测结果表明, 特厚煤层顶板分层构成顶板群组并产生组合运动, 具有层位运动特点, 且伴随工作面推进, 层位顶板运动存在阶跃现象。基于地表裂缝形态及钻孔多点岩移观测反演, 揭示了特厚煤层开采过程中的顶板断裂及运动特征, 认为特厚煤层开采覆岩扰动高度大, 坚硬顶板断裂具有转向特征, 伴随煤层开采推进, 由低位顶板层位的横向“O-X”断裂逐渐向高位硬岩的纵向“O-X”断裂转向; 特厚煤层坚硬顶板开始发生断裂转向的临界位置即所谓的煤层开采“见方”区, 合理解释了工作面开采的“见方”来压现象; 高位顶板纵向断裂尺寸大, 扰动影响范围广, 是诱发采场强矿压的主要因素, 确定了特厚煤层采后覆岩“低-中-高”层位结构的合理性, 为大空间采场大小周期及强矿压显现的准确解释提供了依据。

**关键词:** 特厚煤层; 坚硬顶板; 覆岩结构; 覆岩运动; 见方来压

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0095-10

### Analysis of overburden structure and evolution characteristics of hard roof mining in extremely thick coal seam

YU Bin<sup>1</sup>, KUANG Tiejun<sup>2</sup>, YANG Jingxuan<sup>3</sup>, ZHU Weibing<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Security, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Jinneng Holding Coal Group Co., Ltd., Datong 037003, China;

3. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The mining of extremely thick coal seam form a large space stope, the fracture disturbance of hard roof spreads to a wide range, the working face weighting has the characteristic of “strong mine pressure”, it is obviously different from rock burst, especially when the coal seam roof “square” mining period, the stope mine pressure is more intense. Based on this, the disturbance height of overburden and fracture characteristics of hard roof in extremely thick coal seam mining are discussed by field measurement and 3D physical similarity simulation. Firstly, the fracturing law of overburden was analyzed based on the field measurement, the results showed that the hard roof was fractured advance the working face during the extra thick coal seams mining. The initial movement of the roof mainly revolved around the base point near the fault line and sinking, behind the working face for a certain distance. The observation results of ground sinking showed that the strata formed a roof groups and moved combined of extra thick coal seams, and there is a step phenomenon during strata movement. The study shows that the disturbance height of overburden in extremely thick coal seam mining is large and the fracture of hard roof has steering characteristics. With the advance of coal seam mining, the transverse “O-X” fracture of low roof layer gradually turns to the longitudinal “O-X” fracture of the high hard rock. The critical position of fracture turning of hard roof in extremely thick coal seam is

收稿日期: 2022-10-19

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1709

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074261)

作者简介: 于 斌(1962—), 男, 黑龙江海伦人, 教授, 博士生导师, 博士。Tel: 0352-7012930, E-mail: yubin0352@163.com

the so-called “square” area of coal seam mining, which reasonably explains the phenomenon of “square” pressure in working face mining. The large longitudinal fracture size of the high roof and the wide range of disturbance influence are the main factors inducing the strong mine pressure in the stope. The rationality of the “low-medium-high” layer structure of the overburden in extremely thick coal seam after mining is determined, which provides a basis for the accurate interpretation of the large space stope size cycle and the strong mine pressure.

**Key words:** extremely thick coal seam; hard roof; overburden structure; overburden moving; roof weighting in square meter

## 0 引言

大同矿区煤炭开采历史上经历过典型的侏罗系坚硬顶板煤层开采阶段, 矿区当时以“三硬”(顶板硬、底板硬、煤层硬)条件赋存及其治理而闻名业界<sup>[1]</sup>。近年来矿区侏罗系煤层开采殆尽, 深部石炭系特厚煤层逐渐发展成产煤主力<sup>[2-3]</sup>。矿区石炭系煤层赋存厚度 14~20 m, 煤层采场空间大, 覆岩扰动范围广, 影响层位高, 开采中经常伴有复杂来压现象, 基于经典矿压理论解释总是存在一定片面性<sup>[4-6]</sup>。例如, 根据经典矿压理论计算确定的矿压主导关键层位, 即便能得到较好控制, 还是难以杜绝采场强矿压的发生, 频繁出现支架安全阀开启甚至压架事故, 对于宽煤柱(38 m)留设环境下的邻空巷道围岩大变形控制更是束手无策<sup>[7-9]</sup>。据此, 国内学者围绕大同矿区特厚煤层覆岩结构及其矿压作用机理开展了长期的科研攻关, 普遍认识到特厚煤层开采形成的大空间是导致采场覆岩结构特征及矿压显现异于平常的关键因素, 据此基于高位岩层的运移特征建立了系列的覆岩结构力学模型, 分别从不同角度揭示了大空间采场矿压作用机理<sup>[10-12]</sup>。当然, 也有专家学者专门针对高位厚硬岩层的断裂机制及其断裂后的块体运移规律分别开展研究, 探索了顶板断裂前后的采场矿压显现规律<sup>[13-18]</sup>。综上分析, 特厚煤层开采工作面覆岩结构及运动独具特点, 不同于一般厚度煤层开采条件, 特厚煤层采场空间大, 覆岩扰动范围广。一般煤层厚度条件下的顶板关键层位置, 在特厚煤层开采环境下有可能处于顶板垮裂区范围。在特厚煤层采动过程中, 煤层覆岩将以怎样的结构形态呈现、顶板断裂运动如何演化等均需深入研究。为此, 从现场实测和相似模拟的角度, 研究大同矿区特厚煤层开采引起的地表变形特征及顶板断裂时空规律, 探索大空间采场覆岩结构演化特征, 为特厚煤层采场矿压作用机理的准确揭示提供依据。

## 1 特厚煤层顶板断裂运移实测

### 1.1 工作面地质概况

大同矿区当前主采 3-5 号石炭系特厚煤层, 煤岩

赋存具有一定相似性。基于矿区同忻煤矿特厚煤层开采背景, 实测分析煤层采后地表变形及覆岩运移规律。同忻煤矿 8203 工作面位于北二盘区, 井下位于北二盘区东部, 为北二盘区首采工作面。工作面地形地貌为低山丘陵台地, 大部分为黄土覆盖, 地面没有建筑物及水体, 煤层开采后会产生地面裂缝。工作面埋深 386~523 m, 走向长度 2 250~2 213 m, 倾斜长度 200 m, 工作面标高+790~+818 m。同忻煤矿 8203 工作面平面布置, 如图 1 所示。

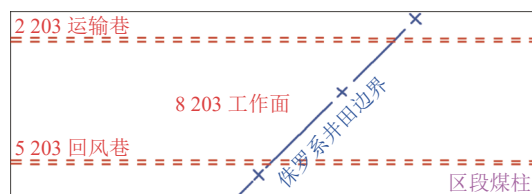


图 1 8203 工作面平面布置

Fig.1 Layout of No.8203 coal face

工作面煤层厚度在 14.36~30.81 m, 平均煤厚 21.0 m; 倾角 0°~3.5°, 平均倾角 1.75°。煤层硬度 1~2, 属于较稳定煤层, 无大构造。直接顶厚度平均 4.9 m, 岩性为砂质泥岩; 基本顶厚度大于 10 m, 岩性为砂质泥岩、砂砾岩、粗砂岩。工作面钻孔柱状, 如图 2 所示。8203 工作面采用单一走向长壁后退式综合机械化低位放顶煤采煤方法, 采高 3.9 m, 放煤厚度 17.1 m, 自然垮落法管理顶板。

采用关键层判别软件 KSPB V5.0, 初步识别特厚煤层顶板特性, 第 1 层亚关键层为厚度 12.1 m 的粉砂岩, 对应埋深为 454.1~466.3 m; 第 2 层亚关键层为厚度 9.6 m 的粗砂岩, 对应埋深为 420.8~430.4 m; 第 3 层亚关键层为厚度 8.6 m 的粉砂岩, 对应埋深为 395.7~404.3 m; 主关键层是厚度 23.3 m 的粗砂岩, 对应埋深为 362.0~385.3 m。

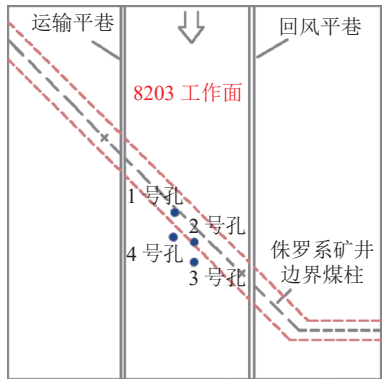
### 1.2 特厚煤层覆岩扰动高度

8203 工作面对应地表范围内布置 4 个地面钻孔。其中, 1 号和 2 号孔主要用于取芯和钻孔电视, 摄像头沿孔壁可下探深度进行全长观测; 1~4 号孔用于岩移观测, 位移基点对应顶板关键层所在层位布设。地面钻孔布置及观测装备配置, 如图 3 所示。SYKJ



层号	层厚/m	埋深/m	岩性	关键层	柱状
23	2.8	339.8	粗砂岩		
22	2.7	342.5	粗砂岩		
21	8.3	350.8	粉砂岩		
20	1.2	352.0	粗砂岩		
19	8.4	360.4	粉砂岩		
18	2.1	362.5	中砂岩		
17	23.3	385.7	粗砂岩	主关键层	
16	2.7	388.4	粉砂岩		
15	4.8	393.2	中砂岩		
14	3.0	396.2	粗砂岩		
13	8.6	404.7	粉砂岩	亚关键层	
12	6.4	411.2	细砂岩		
11	10.1	421.3	粉砂岩		
10	9.6	430.8	粗砂岩	亚关键层	
9	4.8	435.6	中砂岩		
8	4.9	440.5	粉砂岩		
7	1.9	442.4	粗砂岩		
6	6.6	448.9	粉砂岩		
5	5.2	454.1	砂质泥岩		
4	12.1	466.3	粉砂岩	亚关键层	
3	4.4	470.7	砂质泥岩		
2	4.6	475.3	粉砂岩		
1	4.9	480.2	砂质泥岩		
0	21.0	501.2	煤层		

图 2 8203 工作面钻孔柱状  
Fig.2 Drilling histogram of No.8203 coal face



(a) 地面观测孔布置



(b) 钻孔电视

图 3 地面钻孔布置及观测装备  
Fig.3 Ground drilling layout and observation equipment

型高清钻孔全景摄像仪器, 搭载高分子液晶显示屏, 镜头可变焦, 1 200 万静态像素, 高透光树脂镜片不易破碎; 探头下放采用专业防水电缆, 最大可承受拉

力 2 000 kN。

观测孔距离工作面开切眼较远, 位于工作面走向和倾向的中部位置, 孔间距保持在 40 m 左右。当工作面推进距离观测钻孔 100 m 以外时, 开展 1~2 次钻孔扰动观测; 工作面推进距离观测钻孔前后 50~100 m, 每 3~5 d 观测 1 次钻孔扰动状态; 当工作面位于观测钻孔前后 50 m 范围内, 每 1~2 d 观测 1 次钻孔受扰情况, 如图 4 所示。

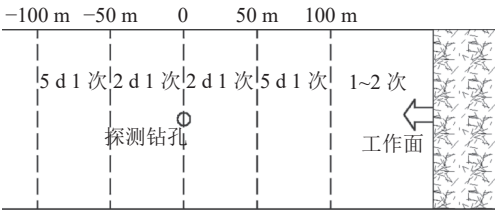


图 4 地面钻孔电视观测方案  
Fig.4 Scheme of ground borehole TV observation

1) 1 号钻孔观测结果。2015 年 8 月 5 日, 当工作面距离 1 号钻孔 118.3 m, 在孔深 219.6 m 位置, 钻孔发生错层堵孔, 该区段未见有套管护孔; 在孔深 203.9 m 位置也存在未用套管护孔现象, 孔壁围岩出现破碎现象, 如图 5 所示。

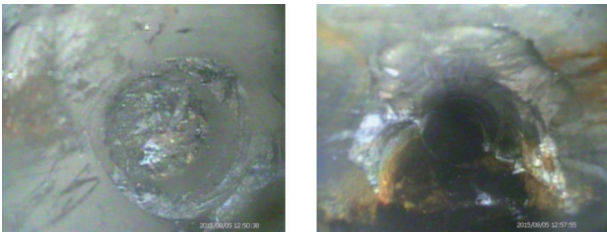


图 5 地表 1 号钻孔初次观测结果  
Fig.5 Initial observation results

2015 年 8 月 29 日, 工作面持续向 1 号钻孔推进, 距离 1 号钻孔仅剩 11.1 m, 实测得到的孔壁围岩破坏明显, 钻孔错层位移增加, 孔径收敛, 如图 6 所示。

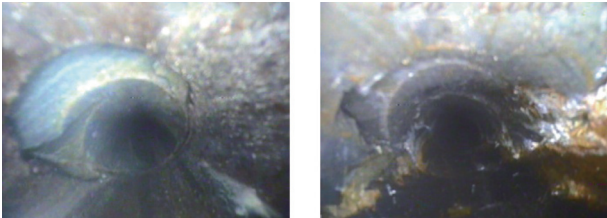


图 6 地表 1 号钻孔二次观测结果  
Fig.6 Secondary observation results

2015 年 9 月 14 日和 2015 年 9 月 23 日, 当工作面推过 1 号钻孔 52.9 m 和 95.1 m 时, 孔壁围岩破坏严重, 钻孔错层位移不断增加, 探头允许通过尺寸逐渐减小, 直至在孔深 219.6 m 位置钻孔处于堵死状态,

无法进一步深入观测。

8203工作面平均埋深454.5 m, 钻孔深度位置203.9 m和219.6 m距离煤层高度分别为250.6 m和234.9 m。表明特厚煤层开采过程中, 覆岩扰动高度达到了250 m左右, 扰动影响区超前工作面至少118.3 m。工作面推进靠近钻孔位置过程中, 超前工作面的覆岩扰动区顶板允许活动空间受限, 孔内观测到的岩层错位变形幅度较小; 当工作面推过钻孔位置后, 采空区覆岩允许活动空间范围大, 孔壁岩层错位变形明显, 甚至产生堵孔现象。工作面推进中的覆岩扰动层位及孔内变形情况, 如图7所示。

根据前述实测分析判断, 特厚煤层开采扰动导致高位岩层的断裂, 伴随工作面的推进(工作面距1号孔118.3 m至11.1 m), 高位岩层破断块体旋转下沉, 导致相邻岩层间出现水平错动现象, 且推测高位顶板断裂线超前1号钻孔一定距离, 如图8所示。

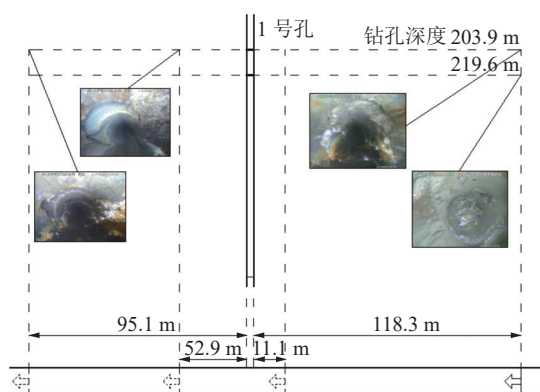


图7 覆岩扰动层位及孔内变形情况

Fig.7 Disturbance strata and deformation in borehole

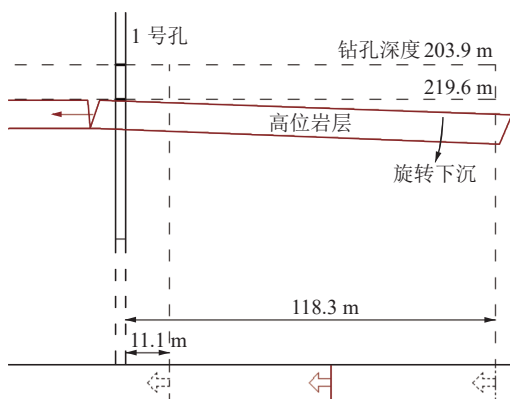


图8 高位岩层断裂反演

Fig.8 Fault of high strata

2) 2号钻孔观测结果。2号钻孔具备连续观测条件。2015年9月11日, 工作面距离2号钻孔10.5 m, 钻孔壁面光滑完整, 未发现明显裂隙; 9月13日, 工作面推进至距2号钻孔0.5 m时, 孔壁围岩

出现变形破坏现象, 在孔深442 m位置发生堵孔, 在孔深417~419 m、421~431 m、437~441 m位置, 孔壁围岩产生垂直条状片落和凹坑现象, 如图9所示。

根据3-5号煤层工作面埋深480 m条件, 判断煤层采动影响覆岩裂隙发育高度为38 m, 对应的堵孔层位与煤层覆岩厚6.6 m的粉砂岩顶板破断回转有关。2015年9月14日, 工作面推过钻孔6.8 m, 2号钻孔在360 m孔位又出现堵孔现象, 但渗透性良好, 无积水; 9月15日和9月16日, 工作面分别推过钻孔13.2 m和17.2 m, 2次观测中, 钻孔360 m孔位已封堵密实, 存在积水, 如图10所示。

根据2号孔的电视观测结果, 反演得到特厚煤层顶板断裂运动特征, 如图11所示。在工作面距离钻孔10.5~0.5 m, 低位岩层初始断裂并产生旋转下沉。在靠近钻孔0.5 m位置才发生堵孔现象, 说明低位岩层起始断裂线距离钻孔不会太远。

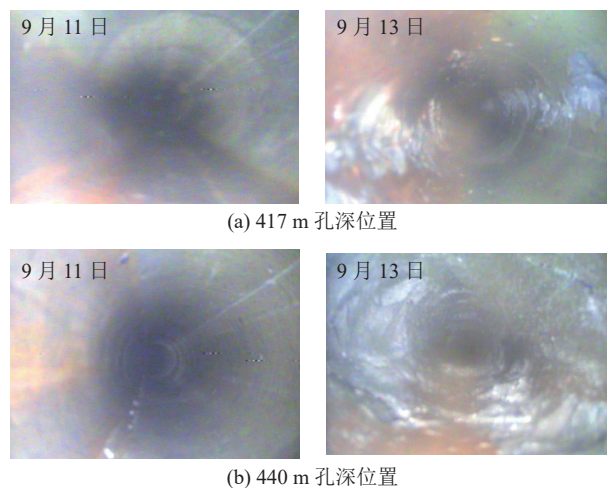


图9 地表2号钻孔观测结果对比

Fig.9 Comparison of observation results in No.2 borehole

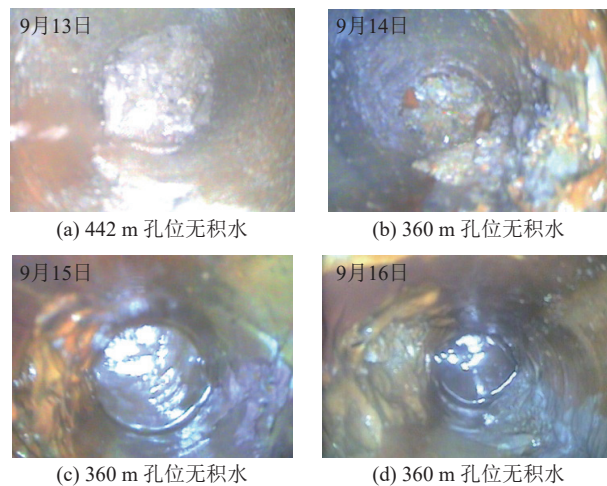


图10 地表2号钻孔堵孔位置变化

Fig.10 Plugging position of No.2 borehole

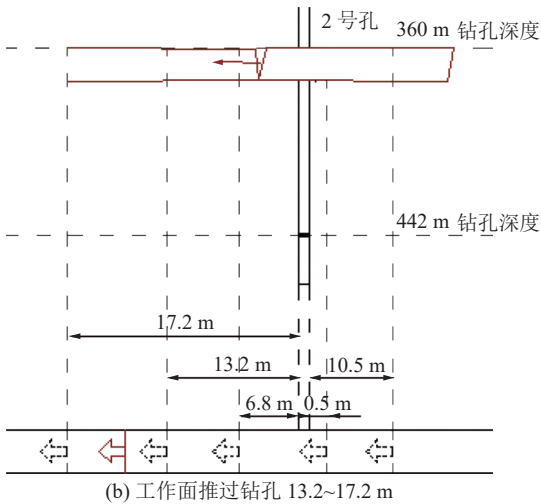
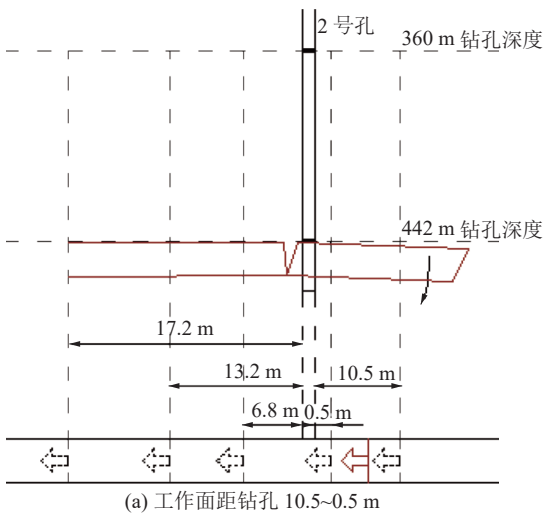


图 11 工作面推进过程中的覆岩运动  
Fig.11 Overlying strata movement of coal face

当工作面推过钻孔 6.8 m 位置时,观测孔深 360 m 位置发生堵孔,说明该位置处顶板层位间出现了错动;孔内无积水,表明临近层位间存在离层缝隙。工作面推过钻孔 13.2~17.2 m,观测孔深 360 m 位置同样处于堵孔状态,单孔内存有积水,说明滞后工作面一定距离,采空区顶板活动将趋于稳定,层位顶板离层间隙闭合,导致观测孔内具备保水条件。

针对 8203 工作面推过 2 号地面钻孔前后,采用地面钻孔电视方法,实测分析了孔壁围岩错动变形情况,得到的孔内封堵位置与工作面推进关系,如图 12 所示。

地面钻孔电视观测研究指出,孔内错动性封孔现象是由顶板分层间的不同步水平位移产生,观测孔错动性封孔体现着不同层位顶板运动强度存在差异。图 12 所示的孔内封堵层位与工作面推进度之

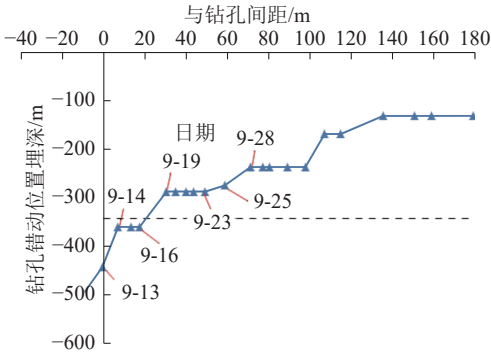


图 12 孔内封堵位置与工作面推进关系  
Fig.12 Relationship of plugging position and coal face advancing

间的关系表明,煤层开采过程中观测孔封堵层位局限于几个特征性岩层位置,高位岩层运动受煤层采动影响具有滞后性,一般在滞后工作面推进 20~30 m 的整数倍范围,低位受扰运动岩层突发性向高位延伸,呈现阶跃性变化。

1.3 特厚煤层覆岩成组运动实测

地面钻孔内部多点位移监测用于分析覆岩不同层位顶板的位移变化。根据前述特厚煤层关键层初步判识结果,对照关键层位置,在每个岩移观测孔内布置 4 个位移监测基点,基点深度见表 1。

表 1 岩移观测孔内的测试基点布置  
Table 1 Test points layout in observation hole

观测孔编号	岩移测试基点深度/m			
	1号测点	2号测点	3号测点	4号测点
3	460	419	367	342
4	452	423	370	331

需要说明的是,表 1 中所属的测试基点深度均由对应的观测孔孔口位置起算。岩移测试基点由钢丝倒爪固定,自下而上分别安装,由柔性不可伸缩钢丝绳引出孔外,连接至位移自动读取采集装备。2015-08-01—2015-08-20,自 8203 工作面推过地面钻孔位置,对地面钻孔内岩移基点位移变化持续观测,得到特厚煤层采动影响下的覆岩断裂运移规律,如图 13 所示。

图 13 所示的钻孔岩移规律反映了特厚煤层覆岩复杂运动规律。伴随工作面推过 4 号地面钻孔距离的增加,孔内相同观测基点上的岩移数据呈现台阶变化,最后趋于稳定。说明煤层采动影响下的覆岩运动并不连续,对应工作面某一特征推进长度,顶板产生一次突发运动;同时,4 个测试基点上的岩移数据发生阶跃变化的时机基本一致,说明工作面采



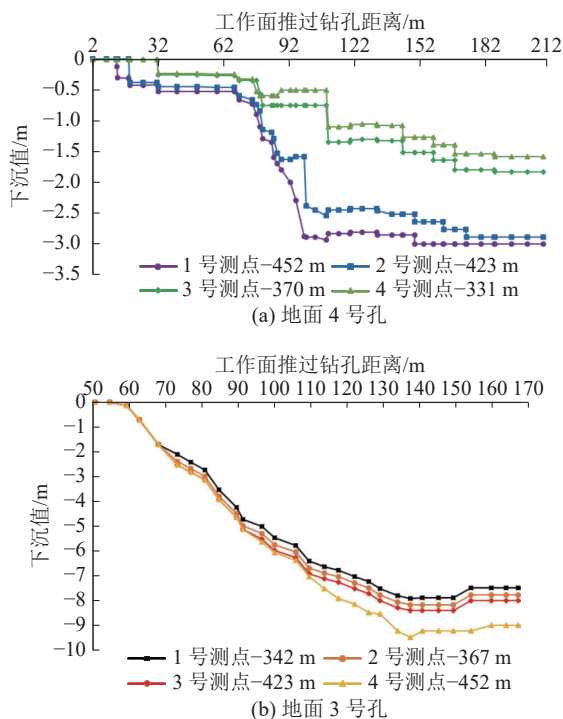


图13 特厚煤层开采地面钻孔岩移观测结果

Fig.13 Strata movement observation results in extra thick coal seam

动激发不同层位的顶板运动具有同时性,但顶板分层间的位移变化并不协调,越靠近煤层采动区,顶板运动位移越大,导致不同测试基点所在岩层间发生明显离层现象。

对应孔内相同测试基点上的岩移数据,3号地面钻孔岩移曲线并未出现明显的阶跃变化。说明伴随工作面的推进,采动影响下的覆岩运动具有连续性,并最终趋于稳定状态,期间无顶板突发性运动产生;同时,不同测试基点上的位移变化相对稳定,顶板分层间离层量不大,认为此时受扰顶板层位之间将产生组合运动。

按照孔内岩移测点布置方式,当工作面推过岩移钻孔,工作面覆岩具备群组运动特点(具有某些相似特性的多个顶板分层组成一个顶板群组),受采动影响程度不同,顶板群组间可能出现阶跃运动,也有可能呈现连续运动。特厚煤层顶板群组运动特征,如图14所示。

根据图14所示的覆岩运移特征解释4号孔岩移规律:工作面推过岩移观测孔的初始阶段,采动影响程度低,煤层顶板未沿煤壁断裂,顶板位移整体偏小,但群组间不同步运动,存在离层间隙;工作面持续推进,顶板群组超前断裂,位移突跃上升,但群组间的不同步运动,导致离层间隙较初始阶段有所增加;“低-中”位顶板群组采动影响大,顶板运移连续,

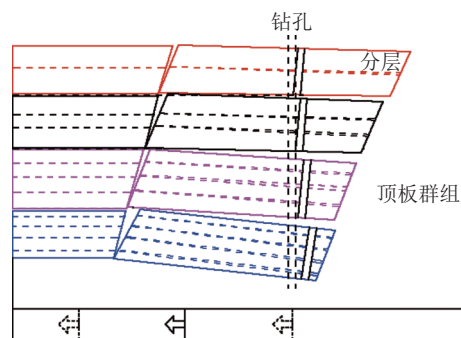


图14 特厚煤层顶板群组运动特征

Fig.14 Strata movement characteristics in extra thick coal seam

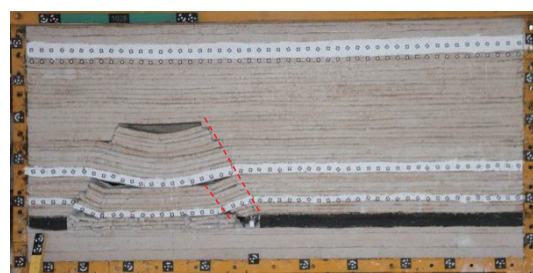
群组间离层间隙明显升高,高位顶板群组受扰幅度小,处于暂时稳定状态;工作面推进距离进一步增加,“低-中”位顶板群组运动最终波及高位岩层,导致“高-中-低”位顶板群组联动失稳,顶板位移阶跃上升,但受限于覆岩空间效应,“低-中”位顶板群组运动同步(离层间隙变化不明显),产生较大位移,高位顶板群组相对于“低-中”位顶板运动位移较小,“低-中-高”位顶板群组间的离层间隙进一步加大。对于3号孔岩移规律的解释更为简单,伴随工作面的推进,顶板群组间的离层间隙变化不大,群组间同步运动,位移连续变化,直至滞后工作面一定距离,“低-中-高”位顶板群组间的运动协调被打破,离层间隙有所增大。

#### 1.4 特厚煤层顶板沿煤壁断裂

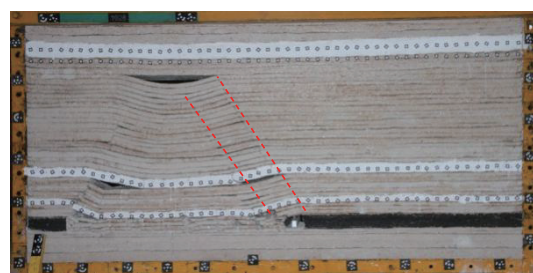
基于8203工作面煤岩赋存特征,开展特厚煤层覆岩运动的二维物理相似模拟试验,观测煤层开采过程中的覆岩运移规律。前述分析给出了特厚煤层开采过程中的覆岩“低-中-高”层位结构,是覆岩运动在纵向(沿煤层法向)上的一种结构特征体现。在工作面推进方向上,观测到的覆岩断裂特征,如图15所示。

工作面自开切眼推进80m左右,直接顶垮落波及低位亚关键层高度(约26m),厚硬岩层及其上覆的薄弱顶板组合运动,引发顶板群组沿煤壁断裂;顶板起始断裂线下延至工作面煤壁,连同沿支架尾梁上延的断裂线,在工作面支架上方划分出明显的旋转块体区间。

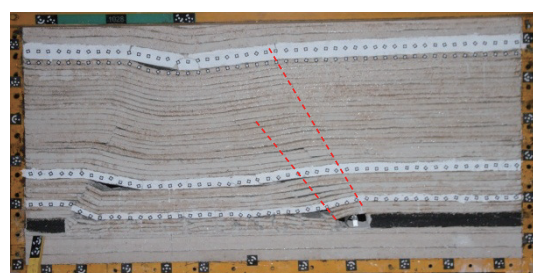
当工作面推进140m左右,覆岩扰动波及中位亚关键层(49m)及其上覆的薄弱顶板时,顶板群组沿煤壁断裂,起始断裂线下延至工作面煤壁;伴随工作面的推进,支架上方的旋转块体区间高度不断向上发展,且以中位亚关键层为界,其下位旋转块体以组合悬梁形式呈现,上位旋转块体间相互咬合,形成砌体梁结构。



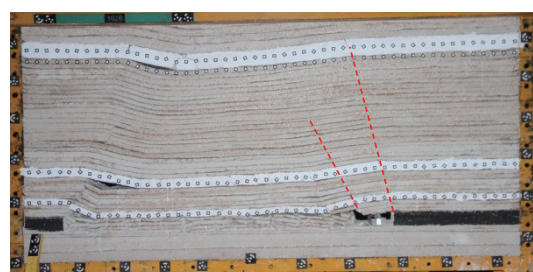
(a) 中位顶板群组起始断裂



(b) 中位顶板群组断裂演化



(c) 高位岩层起始断裂



(d) 层位顶板的组合运动

图 15 特厚煤层覆岩断裂特征

Fig.15 Fracture of overlying strata in extra thick coal seam

特厚煤层推进 210 m 左右, 覆岩扰动最终波及高位关键层, 连同其上覆薄弱顶板产生组合失稳, 甚至波及地表; 在此过程中, 覆岩顶板始终沿煤壁断裂, 起始断裂线自覆岩活动边界下延至工作面煤壁, 超前支架前探梁位置; 中位厚硬岩层以下, 支架上方破断块体间离层间隙明显, 块体间以组合悬梁形式运动。

在前述二维物理相似模拟试验中均观测到了特厚煤层覆岩始终沿煤壁断裂现象。顶板起始断裂线自覆岩活动边界下延至工作面煤壁, 位于支架前探梁前方, 如图 16 所示。

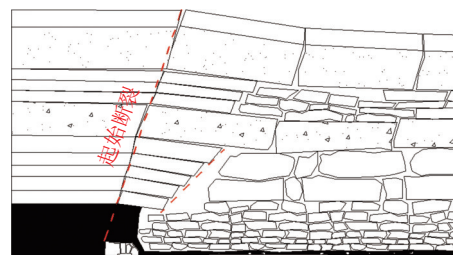


图 16 特厚煤层覆岩沿煤壁断裂

Fig.16 Overburden fracture in extra thick coal seam

需要说明的是, 在煤层初采期间, 覆岩扰动高度小, 工作面采动影响波及低位关键层前, 顶板起始断裂线首先沿支架尾梁向上延展, 及至低位关键层乃至其上覆岩层组合运动期间, 顶板起始断裂线始终超前支架前探梁位置。

## 2 特厚覆岩层位结构及演化规律

### 2.1 顶板断裂转向的实测分析

特厚煤层工作面推进过程中, 采空区空间尺寸大, 覆岩扰动向发展, 逐渐波及地表。根据邻近塔山煤矿井田采空区对应地表塌陷裂缝分布, 得到一种由地表裂缝表征的地表宏观变形状态, 如图 17 所示。图 17a 中塔山煤矿石炭系 3-5 号层 8105 工作面, 于 2010 年 9 月开始回采, 2012 年 4 月回采结束。采位 95 m 地表出现裂缝, 长度 230 m, 宽度 0.2~0.6 m; 160 m 出现塌陷坑; 图 17b 中塔山煤矿石炭系 3-5 号层 8115 工作面, 于 2019 年 8 月开始回采, 2020 年 6 月回采结束, 采位 86 m 地表出现裂缝, 长度 150~220 m, 宽度 0.2~0.8 m。

图 17 所示的地表断裂线呈“X”形。对照井下工作面平面布置方式, 认为地表断裂长轴线沿工作面推进方向, 不同于矿压理论中的顶板横向“O-X”断裂形态(“O”形圈范围内的顶板断裂长轴线沿工作面倾向)。据此推断, 特厚煤层开采覆岩扰动影响延展至地表过程中, 顶板断裂形态将在煤层覆岩某一层位发生转向, 自煤层近区覆岩的横向“O-X”断裂向高位岩层的纵向“O-X”断裂形态转变, 如图 18 所示。

### 2.2 特厚煤层覆岩层位结构特征

1) 地表变形及钻孔电视反演。地表变形观测数据表明, 特厚煤层开采扰动范围大, 波及地表变形。钻孔电视数据分析指出, 特厚煤层开采过程中, 工作面覆岩具有超前断裂倾向, 高位岩层断裂线甚至超前工作面 118 m; 伴随工作面的推进, 高位岩层旋转下沉, 电视孔不同孔位岩层间产生错动; 受限高位岩层运动主导, 其下位岩层产生随动现象, 高位顶板断



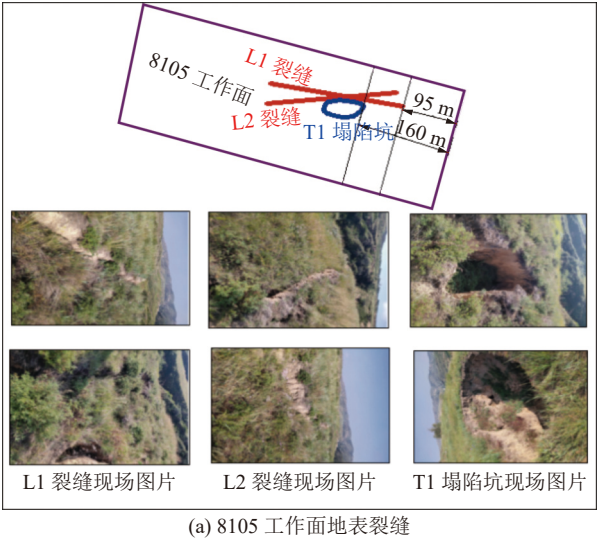


图 17 工作面地表变形状态  
Fig.17 Surface deformation state of coal face

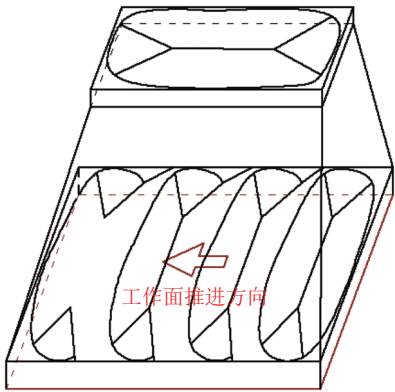


图 18 特厚煤层顶板断裂形态转变  
Fig.18 Roof fracture morphology in extra thick coal seam

裂缝继续下延;当工作面推进一定距离后,采空区顶板运动趋于稳定,顶板破断块体反转,电视孔内原封闭状态局部解除。因此,基于地表变形及钻孔电视

数据反演,得到特厚煤层开采过程中存在的覆岩结构局部特征,如图 19 所示。

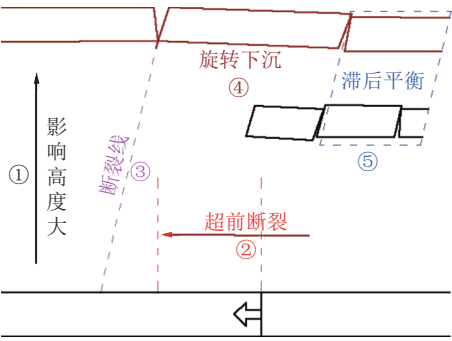


图 19 横向覆岩结构局部特征  
Fig.19 Local characteristic of horizontal overlying structure

2)孔内多点岩移观测反演。工作面地表钻孔岩移规律表明,特厚煤层开采过程中,覆岩活动以顶板群组为单位产生组合运动,如图 20 所示。顶板群组间或者同步运动,群组间离层量相对固定;或者同时运动,但群组间运动幅度不协调,产生较大离层;体现出明显的层位结构特点。同时,在工作面推进过程中,顶板群组运动还具有位移阶跃变化特征,或者是“低-中”位顶板群组突发联动,高位顶板群组滞后响应;或者“低-中-高”顶板群组联动产生位移阶跃变化。

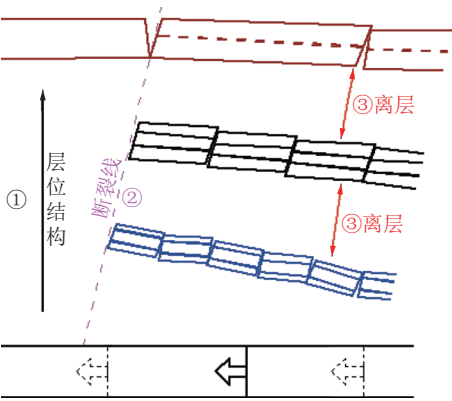


图 20 纵向覆岩结构局部特征  
Fig.20 Local characteristic of vertical overlying structure

3)基于实测的覆岩物理结构。综合前述实测分析得到的地表变形、钻孔电视以及孔内岩移数据,揭示了特厚煤层开采过程中的顶板断裂及运动特征:①开采扰动层位高;②顶板超前断裂;③顶板组合运动;④群组间具有阶跃位移;⑤破断块体滞后平衡。据此,提出特厚煤层覆岩具备层位结构特征,如图 21 所示。

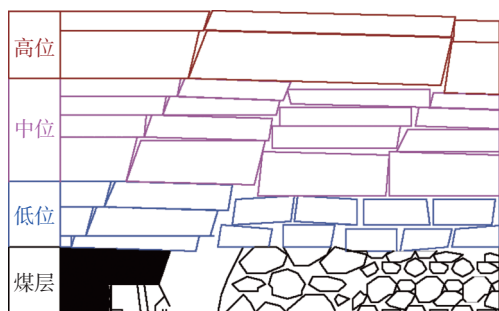


图 21 特厚煤层覆岩结构特征

Fig.21 Overlying strata structure characteristic in extra thick coal seam

特厚煤层覆岩断裂具有横、纵转向特征；“低-中”位顶板受特厚煤层采动影响强烈，沿工作面倾向的断裂尺寸大于煤层开采方向上的暴露长度，覆岩以横向“O-X”断裂形态出现，沿工作面推进方向的断裂尺寸相对较小；特厚煤层采动波及高位岩层时，受采空区覆岩断裂边界影响，高位岩层沿工作面倾向的允许运移空间愈发有限，但伴随工作面推进长度的增加，高位岩层呈现纵向“O-X”断裂形态，沿工作面推进方向的顶板断裂尺寸较大。

特厚煤层采场空间大，覆岩扰动层位高，工作面支架承载能力有限，覆岩悬板受力支点前移，导致特厚煤层开采过程中顶板普遍沿煤壁断裂，煤层顶板起始断裂线始终超前工作面支架前探梁。以中位厚硬岩层为界，其下位顶板群组受采空区矸石支撑影响较小，以组合悬梁结构呈现，共同旋转运动；其上位顶板分层间的离层间隙趋于闭合，顶板块体允许运移空间有限，分层顶板运动所受夹持作用增强，顶板块体间规则排列，块体间相互挤压咬合，呈现砌体梁结构。高位岩层由于纵向断裂的原因，破断块体尺寸较大，相互咬合的块体间仍以砌体结构特征呈现。

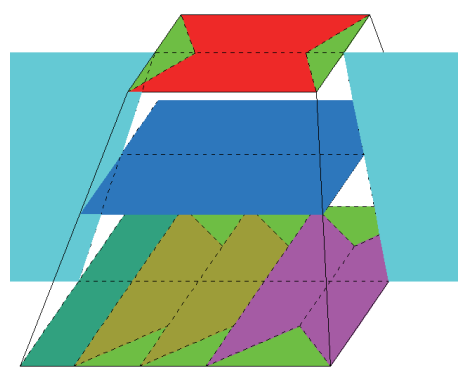
需要说明的是，基于特厚煤层覆岩地表钻孔实测提出的覆岩结构，只说明在垂直煤层方向上覆岩具备层位结构特征，对于具体层位上的顶板断裂特征尺寸并未给出具体论证，但可推测高位岩层断裂尺寸相对较大：特厚煤层开采条件下，覆岩运动空间自下而上逐渐减小，高位岩层运动受邻近岩层的夹持影响越加明显，顶板垂高方向上的等效受力减小，顶板折断需要较大的附加弯矩载荷，对应的顶板悬长则越大。

### 2.3 特厚煤层覆岩层位结构演化

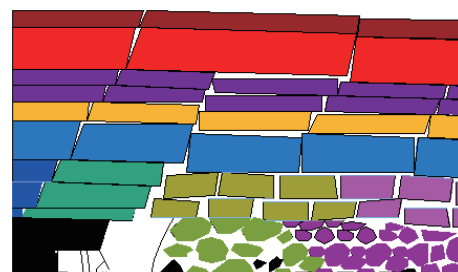
视工作面煤层开采条件，工作面覆岩能否出现顶板的“横-纵”断裂转向，取决于煤层开采厚度决定的采空区空间扰动范围。薄及中厚煤层开采条件下，

覆岩扰动范围小，顶板断裂高度有限，出现顶板断裂转向的几率较小；厚及特厚煤层开采情况下，采场空间大，覆岩扰动范围广，顶板断裂向上延展高度大，具备顶板断裂转向条件，发生覆岩破断转向的几率较高。

综上所述，特厚煤层开采条件下，采空区空间范围大，煤层垂向上覆岩扰动范围广。工作面倾向长度固定不变，工作面自开切眼位置推进过程中，煤层近区覆岩以横向断裂为主。工作面推进长度继续增加，但覆岩层位越高，顶板倾向暴露尺寸越短，最终导致覆岩顶板断裂转向，距煤层一定高度顶板以纵向断裂为主。沿工作面中部做覆岩结构剖面(图 22)，揭示特厚煤层开采过程中的顶板断裂演化过程。



(a) 沿工作面中部做顶板结构剖面



(b) 顶板断裂平面覆岩结构特征

图 22 特厚煤层覆岩顶板结构剖面

Fig.22 Overlying strata structure profile in extra thick coal seam

## 3 结 论

1) 基于地面钻孔电视方法，反演分析了覆岩扰动规律。研究表明，特厚煤层开采过程中，煤层顶板存在超前断裂现象。伴随工作面的推进，顶板初始运动主要是围绕断裂线近区基点旋转下沉，滞后工作面一定距离，运动块体逐渐趋于稳定，甚至出现反转。

2) 地表岩移观测结果表明，特厚煤层覆岩以顶板群组为单位呈现复杂运动状态。顶板分层构成顶

板群组并产生组合运动,群组间或同步,或分组运动,具有层位运动特点,且伴随工作面推进,层位顶板运动存在阶跃现象。

3)地表变形实测结果表明,特厚煤层采后地表变形断裂主轴线沿工作面推进方向,验证了覆岩断裂形态自某一层位向上发生转向的理论构想,煤层顶板断裂由近区的横向“O-X”断裂转向纵向“O-X”断裂,再结合不同层位顶板的断裂尺寸特征,提出了特厚煤层覆岩典型的“低-中-高”层位结构特征。

#### 参考文献(References):

- [1] 匡铁军. 特厚煤层覆岩结构及远近场顶板控制技术研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2020: 1-3.
- [2] 于 斌, 杨敬轩, 刘长友, 等. 大空间采场覆岩结构特征及其矿压作用机理[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3295-3307.  
YU Bin, YANG Jingxuan, LIU Changyou, *et al.* Overburden structure and mechanism of rock pressure in large space stope[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3295-3307.
- [3] 朱卫兵, 于 斌. 大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 99-104.  
ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large space stope[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99-104.
- [4] 孔令海. 特厚煤层大空间综放采场覆岩运动及其来压规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 943-950.  
KONG Linghai. Overlying strata movement law and its strata pressure mechanism in fully mechanized top-coal caving workface with large space[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 943-950.
- [5] 于 斌, 夏彬伟, 喻 鹏. 特厚煤层综放开采坚硬顶板破断对瓦斯涌出影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2243-2249.  
YU Bin, XIA Binwei, YU Peng. Effect of hard roof breaking on gas emission in fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2243-2249.
- [6] 王 君, 朱卫兵, 谢建林. 特厚煤层充分采动覆岩下沉规律研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10): 21-26.  
WANG Jun, ZHU Weibing, XIE Jianlin. Research on subsidence law of overlying strata in full mining of extra-thick coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(10): 21-26.
- [7] 于 斌, 朱卫兵, 李 竹, 等. 特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2398-2407.  
YU Bin, ZHU Weibing, LI Zhu, *et al.* Mechanism of the instability of strata structure in far field for super-thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2398-2407.
- [8] 于 斌, 杨敬轩, 高 瑞. 大同矿区双系煤层开采远近场协同控顶机理与技术[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 486-493.  
YU Bin, YANG Jingxuan, GAO Rui. Mechanism and technology of roof collaborative controlling in the process of Jurassic and Carboniferous coal mining in Datong mining area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 486-493.
- [9] 于 斌, 刘长友, 杨敬轩, 等. 坚硬厚层顶板的破断失稳及其控制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 342-348.  
YU Bin, LIU Changyou, YANG Jingxuan, *et al.* Research on the fracture instability and its control technique of hard and thick roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 342-348.
- [10] 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.
- [11] 薛吉胜, 赵铁林, 潘黎明. “高位-低位”厚硬岩层综放面特厚煤层矿压显现特征研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(7): 55-59.  
XUE Jisheng, ZHAO Tielin, PAN Liming. Research on characteristics of underground pressure behavior of extra-thick coal seams in “high-low” thick and hard rock layers in fully mechanized caving working face[J]. Coal Technology, 2021, 40(7): 55-59.
- [12] 任启寒, 徐遵玉, 陈 成. 特厚煤层综放采场覆岩结构及矿压规律研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(1): 79-83.  
REN Qihan, XU Zunyu, CHEN Cheng. Overburden structure and rock pressure law of fully-mechanized top coal caving stope in extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2021, 53(1): 79-83.
- [13] HE Fulian, LI Xiaobin, HE Wenrui, *et al.* The key stratum structure morphology of longwall mechanized top coal caving mining in extra-thick coal seams: A typical case study[J]. Advances in Civil Engineering, 2020: 1-13.
- [14] 朱卫兵, 于 斌, 鞠金峰, 等. 采场顶板关键层“横U-Y”型周期破断特征的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 36-43.  
ZHU Weibing, YU Bin, JU Jinfeng, *et al.* Experimental study on horizontal “U-Y” periodical breakage characteristics of key strata in stope roof[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(2): 36-43.
- [15] 何富连, 何文瑞, 陈冬冬, 等. 考虑煤体弹-塑性变形的基本顶板初次破断结构特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2704-2717.  
HE Fulian, HE Wenrui, CHEN Dongdong, *et al.* First fracture structure characteristics of main roof plate considering elastic-plastic deformation of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2704-2717.
- [16] 李 东, 姜福兴, 王存文, 等. “见方效应”与“应力击穿效应”联动致灾机理及防治技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 1014-1021.  
LI Dong, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, *et al.* Study on the mechanism and prevention technology of “square position” and “stress breakdown effect” inducing rock burst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 1014-1021.
- [17] 谭云亮, 胡善超. 顶板见方来压发生条件分析研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 19-22.  
TAN Yunliang, HU Shanchao. Analysis and study on condition to cause roof weighing in square meter[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 19-22.
- [18] 王书文, 焦 彪. 采空区顶板见方垮落的覆岩空间结构特征及形成条件[J]. 中国煤炭, 2014, 40(10): 43-48.  
WANG Shuwen, JIAO Biao. Spatial structure features and formation conditions of square caving overlying strata in goaf roof[J]. Journal of China Coal, 2014, 40(10): 43-48.