

# 缓倾斜厚煤层仰斜开采覆岩及地表损伤特征与机理

谢晓深<sup>1,3</sup>, 侯恩科<sup>2,3</sup>, 赵兵朝<sup>1</sup>, 冯 栋<sup>2,3</sup>, 侯鹏飞<sup>2,3</sup>, 郭维强<sup>4</sup>

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 国家能源集团 宁夏煤业有限责任公司, 宁夏 银川 750408)

**摘要:** 为科学指导鄂尔多斯盆地西部缓倾斜厚煤层开采矿井灾害防治和生态环境保护, 实现西部煤炭的绿色安全开采。以红柳煤矿 I020213 工作面研究为背景, 采用相似材料模拟、实地调查、裂缝原位示踪开挖和理论分析相结合的方法, 分析缓倾斜厚煤层仰采覆岩及地表损伤特征, 并以此构建地表裂缝活动类型的判据, 探究地表裂缝形成及活动机理。结果表明: I020213 工作面顶板覆岩以“悬臂-断裂-铰接-垮落回转-滑移-稳定”的重复性结构向前扩展演化, 采空区上方覆岩破坏形态呈斜梯形的非对称偏移形态, 下山采空区压实度是上山采空区的 1.2 倍, 采空压实区边界整体呈类似抛物线的椭抛面。覆岩离层裂隙宽度具有“增大-减小”的动态变化特征, 坚向裂隙宽度则表现出“增大-稳定”和“增大-减小-稳定”2 种动态特征; 导水裂隙带发育高度呈“快增-缓增-稳定”的递进式动态发育特征, 稳定后发育高度达 145 m。采空区上方地表损伤形式以地表隆起为主, 隆起高度达 2.7~36.0 cm, 平均为 10.14 cm; 工作面边界上方主要发育拉张裂缝和台阶裂缝, 裂缝宽度为 1.5~18.0 cm, 落差最大约 17.0 cm。根据裂缝宽度-深度变化特征, 地表裂缝剖面形态可分为“类楔型”、“类梭型”和“类树枝分叉型”3 类, 且具有偏斜特征, 偏移量与裂缝发育深度呈二次多项式相关。宽度小于 3.0 cm 的裂缝垂向发育深度为 1.70~3.10 m, 垂向深度差为 46.0~190.0 cm/m, 平均垂向深度差为 132 cm/m, 裂缝发育深度与宽度符合线性函数关系。采空区上方地表隆起滞后回采位置发育, 滞后距离为 24.7~71.3 m, 隆起高度均呈现“增加-稳定”的动态变化过程, 活动时间为 11~13 d; 边界裂缝在拉张作用下呈现“持续增大-稳定”和“开裂-稳定”2 种变化特征, 活动时间为 2~12 d。地表裂缝发育类型及活动特征与表土层性质和裂缝间距密切相关。一般情况下裂缝间距越大, 越易形成无闭合活动的台阶裂缝, 反之则容易形成有闭合活动的拉张裂缝。

**关键词:** 缓倾斜煤层; 覆岩破断; 地表裂缝; 演化特征; 形成机理

**中图分类号:** TD325    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-9993(2025)03-1443-15

## Characteristics and mechanism of overlying rock and surface damage in gently inclined thick coal seam mining

XIE Xiaoshen<sup>1,3</sup>, HOU Enke<sup>2,3</sup>, ZHAO Bingchao<sup>1</sup>, FENG Dong<sup>2,3</sup>, HOU Pengfei<sup>2,3</sup>, GUO Weiqiang<sup>4</sup>

收稿日期: 2024-05-20    策划编辑: 郭晓炜    责任编辑: 钱小静    DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0561

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(4217174); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2024JC-YBQN-0361); 陕西省博士后科研资助项目(2023BSHEDZZ297)

作者简介: 谢晓深(1992—), 男, 安徽萧县人, 讲师, 博士(后)。E-mail: 957184158@qq.com

通讯作者: 侯恩科(1963—), 男, 陕西扶风人, 教授, 博士生导师。E-mail: houek@xust.edu.cn

引用格式: 谢晓深, 侯恩科, 赵兵朝, 等. 缓倾斜厚煤层仰斜开采覆岩及地表损伤特征与机理[J]. 煤炭学报, 2025, 50(3): 1443-1457.

XIE Xiaoshen, HOU Enke, ZHAO Bingchao, et al. Characteristics and mechanism of overlying rock and surface damage in gently inclined thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(3): 1443-1457.



移动阅读

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an 710054, China; 4. Ningxia Coal Industry Co., Ltd., CHN Energy, Yinchuan 750408, China)

**Abstract:** In order to scientifically guide the disaster prevention and ecological environment protection of the gently coal seam mining in the west of Ordos Basin, and to realize the green and safe mining of coal. The laws of overlying rock and surface damage caused by overlying mining in gently inclined thick coal seam were revealed, and the formation and activity mechanism of surface cracks were expounded by using the methods of similar material simulation, field investigation, crack excavation and theoretical analysis. The results show that the roof overburden of I020213 face extends forward with the repeatable structural evolution characteristics of “cantilever-fracture-hinged joint-collapse rotation-slip-stability”. The failure form of the overlying rock above the goaf was an oblique trapezoid asymmetric migration shape, the compaction degree of the downhill goaf was 1.2 times that of the uphill goaf, and the whole boundary of the goaf was an elliptical parabola similar to parabola. The fracture width of overlying strata has the dynamic characteristics of “increase-decrease”, while the vertical fracture width shows two dynamic characteristics of “increase-stability” and “increase-decrease-stability”. The development height of water-conducting fracture zone with the progressive development characteristic of “rapid increase-slow increase-stability” was 145 m. The surface damage above the goaf was surface uplift, which uplift height was 2.7–36.0 cm. Tensile cracks with average width of 1.5–18.0 cm and bench cracks with average drop height of 17.0 cm were mainly developed above the boundary of the working face. According to the variation characteristics of crack width and depth, the shape of surface fracture profile with skew characteristics was divided into three types: “wedge-like”, “shuttle-like” and “branch-like bifurcation”, also the offset was quadratic polynomial correlation with the fracture development depth. The vertical development depth of the crack less than 3.0 cm is 1.70–3.10 m, and the vertical depth difference was 46.0–190.0 cm/m(the average:132 cm/m), meanwhile the crack depth and width conform to the linear function. The surface uplift above the goaf lags behind the development of mining position and the lag distance is 24.7–71.3 m, the uplift height shows a dynamic process of “increase-stability”, and the active time is 11–13 days. under the action of tension, the boundary cracks show the characteristics of “continuous increase-stability” and “cracking-stability”, and the active time is about 2–12 days. The topsoil layer's characteristics and the distance between cracks have a direct impact on the types of surface cracks that emerge and their activity characteristics. Step cracks without closed activity are often easier to form with greater crack spacing, but tension fractures with closed activity are easier to form.

**Key words:** gently inclined coal seam; overburden fracture; surface crack; evolution characteristic; formation mechanism

## 0 引言

我国西部煤炭资源/储量丰富,且开发利用程度高,开采规模大,然而半干旱—干旱的自然气候和脆弱的生态环境加剧了该地区煤炭资源开发利用与生态保护的矛盾,给煤炭资源的绿色开发提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。缓倾斜煤层是西部煤炭开采主体之一,其开采引发的覆岩及地表损伤特征兼具近水平煤层开采和倾斜煤层开采的部分特点,覆岩及地表运移相对复杂,损伤特征预测难度大<sup>[4-5]</sup>。因此,探究缓倾斜煤层开采引起的覆岩及地表损伤特征对促进“煤—水—生态”的协同发展有重要意义。

目前,国内外学者针对煤层开采覆岩及地表损伤特征与机理开展了大量的研究,并取得了较丰富的成果。范立民等<sup>[6]</sup>认为西部煤层开采,其地表损伤与煤

层开采强度密切相关;侯恩科等<sup>[7]</sup>、LONG等<sup>[8]</sup>以西部高强度开采煤层为研究对象,揭示了中深埋、深埋缓倾斜煤层开采覆岩移动破坏特征、导水裂隙带发育特征及地表损伤特征;黄庆享等<sup>[9]</sup>采用相似材料模拟和数值模拟相结合的方法,揭示了近距离浅埋煤层群开采覆岩及地表应力场、裂隙场和位移场的演化特征,提出了兼具消除煤柱应力集中和减缓地表塌陷的错距开采方式;左建平等<sup>[10]</sup>、SUN等<sup>[11]</sup>基于关键层理论,采用数值模拟的方法揭示了覆岩破坏时的“类双曲线”运移特征,并提出了覆岩及地表下沉预测方法;谢晓深等<sup>[12]</sup>通过相似材料模拟和数值模拟相结合的方法,揭示了中深埋煤层开采覆岩及地表裂隙演化特征,发现了离层裂隙的“产生—增大—减小—闭合”演化特性,并阐明了地表岩土体活动对地表裂缝活动的控制机制;徐祝贺等<sup>[13]</sup>探讨浅埋高强度开采覆岩结构演化及

地表损伤特征,建立了地表裂缝与地质采矿条件之间的关系模型;鞠金峰等<sup>[14]</sup>利用分布式光纤监测手段,将覆岩移动划分为覆岩超前受压变形、逐层向上断裂运移、覆岩整体快速沉降、上位岩层向下压实阶段以及覆岩整体稳沉5个阶段,并认为关键层的运移状态控制了地表沉陷盆地的最终形态;WANG等<sup>[15]</sup>揭示了浅埋煤层开采覆岩结构特征与工作面回采速度的关系,指出低速回采下覆岩多呈现“台阶岩梁”的结构,快速回采下多呈现“砌体梁”结构,且地表损伤相对小。BAI等<sup>[16]</sup>、郭文兵等<sup>[17]</sup>总结了厚煤层高强度开采覆岩破坏特征,指出其破坏模式可分为切落型破坏和裂缝贯通型破坏2种。

上述研究为深入探究煤层开采覆岩及地表损伤特征奠定了基础,但未对缓倾斜煤层开采覆岩及地表损伤特征与机理进行系统研究,目前,煤矿企业仍多将近水平煤层开采取得的成果用于缓倾斜煤层开采领域。鉴于此,笔者以宁东煤炭基地中部的红柳煤矿I020213工作面为研究背景,采用相似材料模拟的方法探究缓倾斜煤层开采覆岩破坏特征及裂隙演化特征;采用实地观测、原位示踪开挖和裂缝动态监测相结合的方法研究缓倾斜煤层开采地表裂缝空间展布及动态演化特征,揭示地表裂缝地下延展形态和发育特征,进而探讨地表裂缝/隆起的形成机理,以期为西部煤矿区采动顶板动力灾害防治和生态环境修复提供参考。

## 1 工作面概况

I020213工作面位于红柳煤矿东北部,走向长约为664.3 m,倾斜长为315 m,开采延安组2煤,开采厚度为5.46~6.23 m,平均采厚为5.84 m,工作面走向煤层倾角为8°~11°,平均煤层倾角约为8.5°,由东北向西南倾斜,工作面倾向煤层倾角为4°,由东南向西北倾斜。煤层开采深度为320.0~413.0 m,平均深度为356.0 m,由开切眼向终采线位置逐渐变浅。2煤层顶板是延安组第V段细粒砂岩,其上是直罗组地层,厚度为292~339 m,以粉砂岩、粗砂岩和泥岩为主,局部层段分布有细砂岩。直罗组之上是古近系红土层,2层呈不整合接触,红土平均厚度为22.24 m。古近系红土层之上是与之不整合接触的第四系表土层,厚度约为7.0 m,以亚砂土和黄土为主。工作面地形平坦,高差约为3 m,略呈东高西低之势。工作面地表被草本和灌木丛覆盖。I020213工作面采用倾斜长壁仰采,顶板全垮落管理方式于2021年5月开始回采,2022年1月回采结束。工作面东南方向水平距约73 m处为I020211工作面采空区。工作面地质概况如图1所示。

## 2 采动覆岩损伤特征

### 2.1 相似材料模拟模型的构建

以红柳煤矿I020213工作面内的H801钻孔和H802钻孔揭露的地层资料为基础,采用沙、石膏、大白粉和油等材料模拟地层岩性,构建相似材料模拟模型,其中云母粉用于模拟岩层层理和人工节理裂隙。模型几何相似比确定为 $A_L=1:250$ 。设计模型尺寸长×宽×高=2.0 m×0.2 m×1.80 m,其中2煤之上模型最大垂高1.56 m。模型以倾斜长壁仰采的方式开采2煤,每次开挖15 m,共开挖25次,采长375 m,模型参数见表1。

### 2.2 采动覆岩垮落及结构演化特征

#### 1) 采动覆岩垮落特征

当模型开挖至87.5 m时,覆岩弯曲下沉达到其极限值,顶板发生初次垮落,垮落体高度约9.8 m,垮落高度约16.3 m。开切眼位置垮落角为55°,回采位置处岩体垮落角为35°。开挖长度增加至120 m时,采空区范围随之增大,上覆岩体再次发生垮落,垮落高度增加至28.8 m,垮落体高度约为25 m,其上方与弯曲下沉的岩层之间形成约3.8 m的悬空空间,开切眼处垮落角约为57°,回采位置处垮落角约为50°。模型开挖过程中共发生9次垮落,周期性垮落步距15.0~37.5 m,平均28.5 m,与工作面实测值(28.4~40.5 m,平均34.8 m)相近。开挖结束后采空区上方覆岩破坏形态整体呈斜梯形,最大高度为145 m,采空区中部覆岩处于压实状态,压实边界形似椭圆抛物面(简称椭抛面<sup>[18]</sup>),且随着开挖长度的增加,椭抛面会发生偏移(图2a)。椭抛面内离层裂隙在上覆岩体的自重作用下压实,竖向裂隙则在两侧岩体的挤压作用下发生闭合(图2b)。

从模型开挖后覆岩垮落岩块破碎程度可看出,下山采空区岩体破碎程度高,岩体碎块程度大,说明下山方向采空区垮落岩体比上山采空区垮落岩体受到的压力更大。为定量描述该特征,以单位采空区压实度来说明,其定义如下:

$$G_c = \frac{S_r}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $G_c$ 为采空区压实度; $S_r$ 为统计区间内扰动岩块面积, $\text{cm}^2$ ; $S$ 为统计区间总面积, $\text{cm}^2$ 。

选取模型开挖结束上覆岩体稳定后的状态进行统计,以2煤层底板为界,构建一个25 cm×375 cm的统计区间,并沿回采方向将其划分为15个25 cm×25 cm的小区间,统计分析各区间内受扰动岩块的面积。I020213工作面采空区间岩体压实度61.14%~

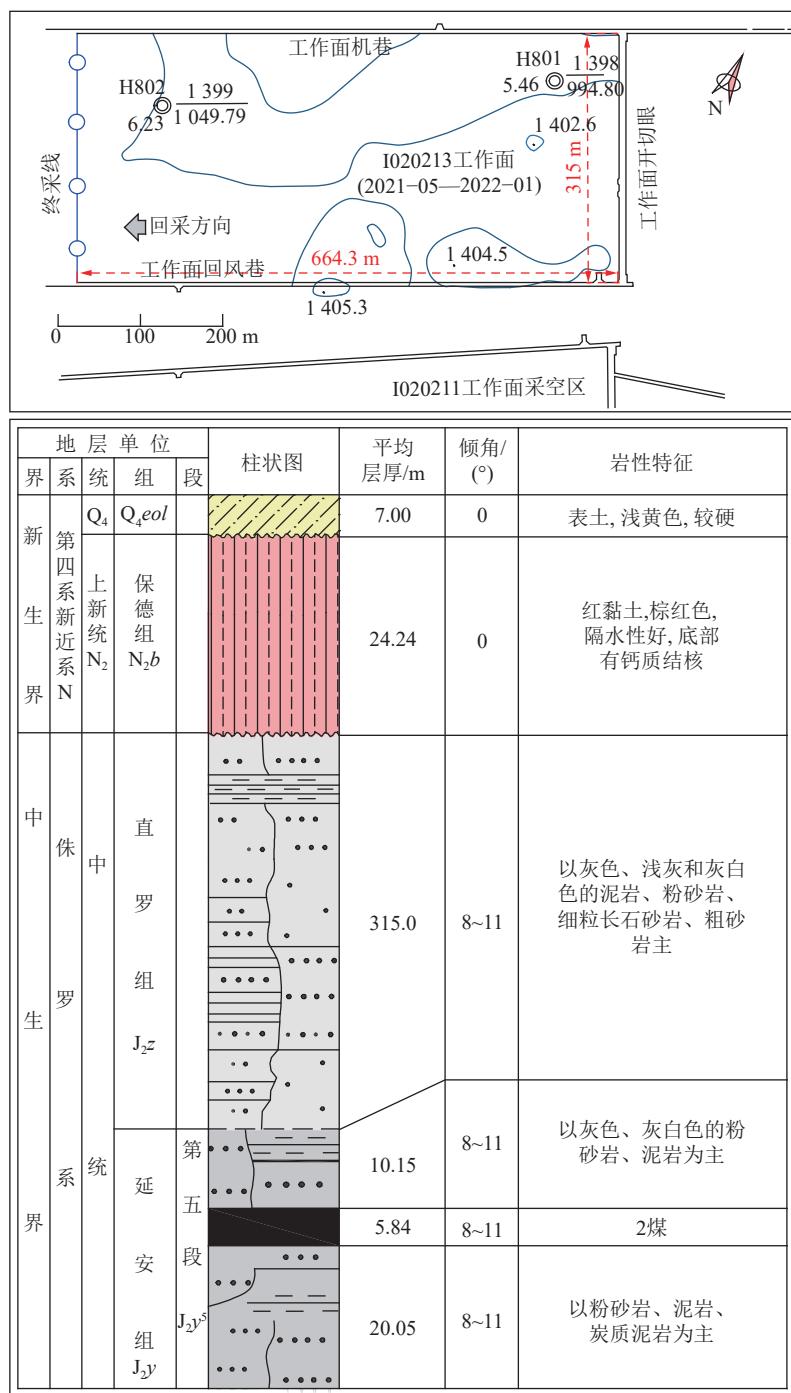


图 1 工作面地质概况

Fig.1 Geological overview of the working face

96.10%，平均为 80.77%。开切眼和终采线位置采空区压实度较小，符合采空区垮落岩体碎胀充填特征。以采空区中心划分下山和上山 2 个采空区后发现，下山采空区压实度大于上山采空区的压实度，下山采空区压实度为 77.72%~96.10%，平均为 87.40%，上山采空区压实度为 61.14%~80.44%，平均为 73.20%，下山采空区压实度约为上山采空区的 1.2 倍（图 3）。

## 2) 采动覆岩结构演化特征

由模拟结果可知：随着工作面的不断推进，采空

区压实度呈递减趋势。这一现象侧面反映出上山垮落岩体有向下滚动或滑动的行为或行为趋势。因此，缓倾斜单煤层仰采顶板覆岩是以“悬臂-断裂-铰接-垮落回转-滑移-稳定”的重复性结构向前扩展演化，最终在采空区上方形成稳定的砌体梁结构（图 4）。

## 2.3 采动覆岩裂隙演化特征

### 1) 覆岩离层裂隙演化特征

基于 I020213 工作面相似材料模拟结果，采空区离层裂隙初始发育宽度为 5.0~15.0 cm，初始发育长

表1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of numerical model rock strata

序号	地层	厚度/m	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	表土	6.0	1 050	1.02	0.30	0.30	0.32	20
2	黏土	24.5	1 580	1.94	0.32	0.50	0.96	35
3	泥岩	13.0	1 850	8.00	0.21	1.30	1.50	25
4	细粒砂岩	7.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
5	粉砂岩	5.0	2 350	10.06	0.18	1.80	2.00	28
6	细粒砂岩	18.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
7	粉砂岩	63.0	2 350	10.06	0.18	1.80	2.00	28
8	细粒砂岩	8.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
9	泥岩	10.0	1 850	8.00	0.21	1.30	1.50	25
10	细粒砂岩	6.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
11	粉砂岩	32.0	2 350	10.06	0.18	3.00	2.35	28
12	细粒砂岩	2.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
13	粉砂岩	21.0	2 350	10.06	0.18	3.00	2.35	28
14	细粒砂岩	7.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
15	泥岩	8.0	1 850	8.00	0.21	1.30	1.50	25
16	粉砂岩	48.0	2 480	23.81	0.18	6.50	5.20	30
17	细粒砂岩	11.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
18	粗粒砂岩	9.0	2 736	11.87	0.27	2.80	5.00	26
19	粉砂岩	3.0	2 350	10.06	0.18	1.80	2.00	28
20	细粒砂岩	6.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
21	泥岩	12.0	1 850	8.00	0.21	1.30	1.50	25
22	粗粒砂岩	23.0	2 736	16.51	0.27	2.80	5.00	26
23	泥岩	8.0	1 850	8.00	0.21	1.30	1.50	25
24	粗粒砂岩	28.0	2 736	11.87	0.27	2.80	5.00	26
25	细粒砂岩	3.0	2 480	12.43	0.23	2.35	3.00	30
26	粉砂岩	3.0	2 350	10.06	0.18	1.80	2.00	28
27	2煤	6.0	1 350	2.89	0.28	0.85	1.00	15
28	底板岩层	52.0	2 650	9.94	0.20	13.40	3.60	35

度为25~60 m。开采阶段前期离层裂隙长度随推进距离的增加呈稍有波动起伏的增长特征。当开采扰动至关键层时,“上硬下软”的岩性差异造成了离层裂隙长度的增大(图5a),初始发育长度与其发育高度存在递减的线性关系,符合一般性规律(图5b)。顶部离层裂隙初始发育宽度表现出波动变化的特征。初始开采阶段,离层裂隙发育宽度较大;充分采动后,垮落岩体碎胀填充采空区后高位岩层的下沉量减小,此外,岩性相近也削弱了相邻岩层之间的不均匀下沉量,导致离层裂隙初始发育宽度变小(图5a)。随着推采距离的增加,离层裂隙宽度呈“增大-减小”的变化特征,对应离层裂隙“产生-扩展-闭合-稳定”的动态演化过程(图5c)。

## 2) 覆岩竖向裂隙演化特征

覆岩竖向裂隙是由于岩体周期性拉张破断形成的。由模拟结果可知:开切眼处的竖向裂隙发育程度最高,斜长最长。面内采空区上方的竖向裂隙发育程度相对较弱。开切眼处竖向裂隙与水平方向的夹角因煤层倾斜而变大,采空区上方竖向裂隙因煤层倾斜而与水平方向夹角变小。

覆岩竖向裂隙的斜长随工作面推进距离的增加而不断增加直至趋于稳定,特别是开切眼处的竖向裂隙其发育高度与导水裂隙带发育高度持平。竖向裂隙宽度在发育过程中表现出“增大-稳定”和“增大-减小-稳定”的动态特征,前者出现在两侧边界竖向裂隙中,后者表现在采空区上方竖向裂隙中(图6),2者

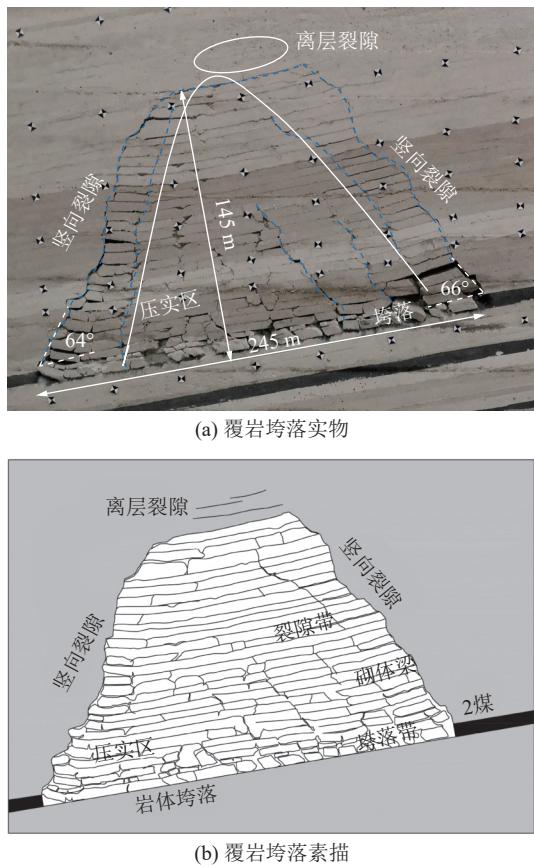


图 2 I020213 工作面开采覆岩垮落特征

Fig.2 Characteristics of overburden by I020213 working face mining

均与采动覆岩结构演化特征有关。

随着模型的开挖,导水裂隙带发育高度表现出“快增-缓增-稳定”的递进式发育特征,对应“孕育-发育-稳定”的发育过程。导水裂隙带发育未突破距离煤层顶板 106 m 处厚度约为 48 m 的厚硬关键层,无关键层破断带来的高度突增现象。经统计,I020213 工作面垮落带高度 43.8 m, 垮采比 7.3, 导高为 145 m, 裂采比 24.2(图 7)。

### 3 采动地表损伤特征

I020213 工作面地表损伤调查结果显示:地表裂缝和挤压隆起是 I020213 工作面采动过程中地表最为明显的 2 种损伤形式。前者主要围绕工作面开采边界密集分布,对地表造成的损伤较为严重;后者零星展布于工作面内,对地表造成的损伤相对较弱,地表损伤形式如图 8 所示。

#### 3.1 采动地表裂缝/隆起发育特征

I020213 工作面地表裂缝有拉张裂缝和台阶裂缝 2 种。拉张裂缝分布于工作面上方的地表,数量占全部裂缝的 98%,部分裂缝末端有次生裂缝,宽度达



(a) I020213 工作面采空区压实度区间划分

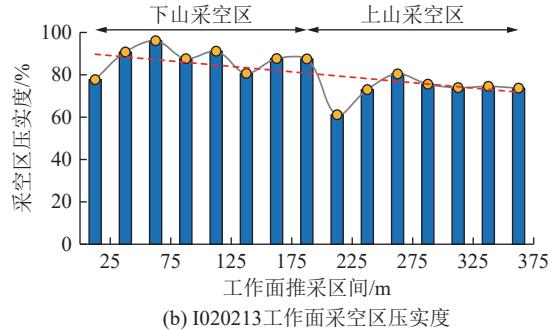


图 3 I020213 工作面采空区压实度分析

Fig.3 Division of compaction interval of goaf of I020213 working face

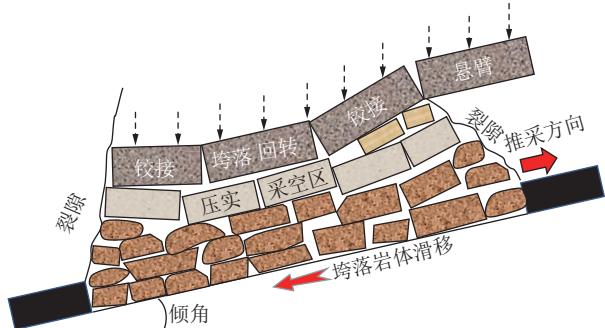


图 4 缓倾斜煤层仰采覆岩结构演化特征

Fig.4 Schematic diagram of overburden collapse by gently inclined coal seams mining

1.5~18.0 cm。相邻裂缝以平行并列的方式分布,平面形态基本保持一致。台阶裂缝主要以平行巷道的方式分布在巷道附近,数量为全部裂缝数量的 2%,落差高度稍大,最大约为 17.0 cm,台阶朝向采空区,局部存在塌陷槽。

工作面地表裂缝发育范围呈现大于已开采范围的“O”型分布,其中工作面机巷侧边界裂缝发育范围 -65.0~43.0 m(“-”表示机巷内侧),裂缝角为 83.83°。回风巷道侧边界裂缝发育范围 -47.0~40.0 m, 裂缝角为 84.26°,两侧裂缝发育范围基本对称。工作面走向上,开切眼外侧裂缝发育范围约为 144.0 m(开切眼处裂缝角为 70.78°),明显大于工作面巷道外侧裂缝的发

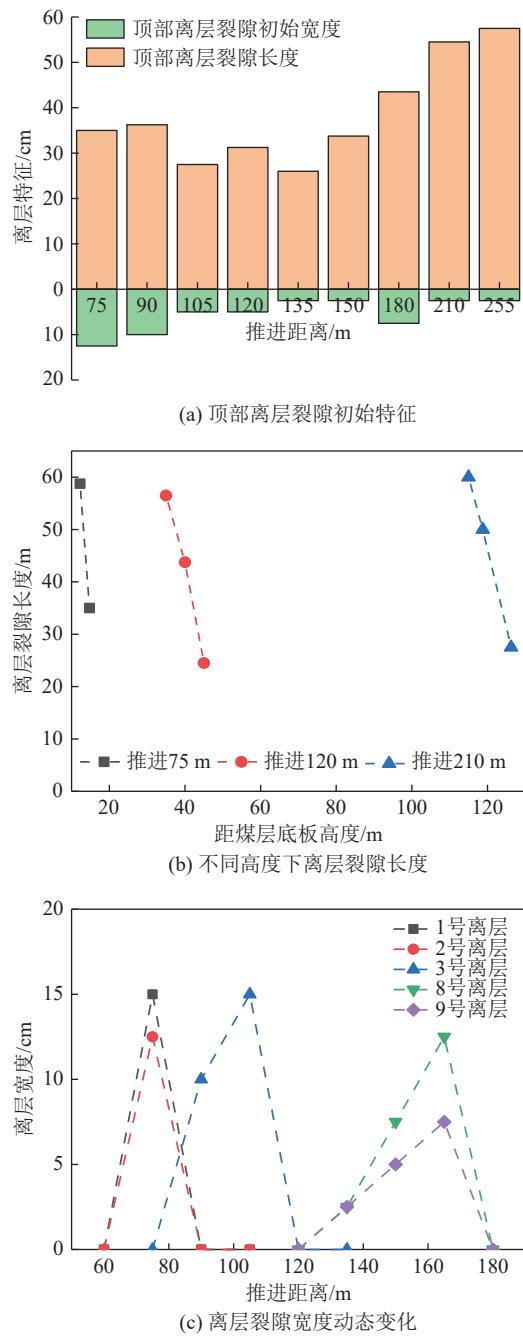


图5 离层裂隙发育特征

Fig.5 Development characteristics of parting fissure length

育范围,大约是其3.5倍。工作面采空区上方基本不发育地表裂缝,以地表隆起为主,间隔距离6.5~69.6 m。其中,近半数的间距在30~50.0 m间,平均为37.1 m,与基本顶周期垮落步距基本一致。面内地表隆起均是单向隆起且隆起朝向与回采方向一致,隆起高度为2.7~36.0 cm,平均为10.14 cm。I020213工作面地表裂缝展布如图9所示。

### 3.2 采动地表裂缝地下延展形态及深度特征

为直观展示出地表裂缝浅层地下延展形态和深度特征,文中采用原位示踪开挖的方法对地表裂缝的

浅层形态实施原位探查。选取I020213工作面开切眼内侧和工作面巷道附近的2条边界裂缝KL<sub>1</sub>和KL<sub>2</sub>进行示踪开挖。KL<sub>1</sub>裂缝位于工作面开切眼内侧5.0 m处,共有3个开挖点;KL<sub>2</sub>裂缝位于工作面回风巷内侧约17.0 m处,共有2个开挖点。裂缝原位示踪与开挖情况如图10所示。

#### 1) 地表裂缝地下空间形态

地表裂缝开挖结果显示,地表裂缝于土层内以无规则形态向下延伸发育,空间形态多样。KL<sub>1</sub>裂缝整体呈现1个“下凹”无规则的空间形态,KL<sub>2</sub>裂缝整体呈现1个“上凸”的空间形态。对比同一裂缝不同开挖点延展形态可以看出,同一裂缝地下形态亦有所差别,比如KL<sub>1</sub>-1处无次生裂缝,KL<sub>1</sub>-2和KL<sub>1</sub>-3处均有次生裂缝。说明,发育位置不同的同一类型裂缝地下空间形态不同,同一裂缝不同位置点的形态亦有所不同。地表裂缝空间发育形态及深度如图11所示。

由于裂缝地下空间形态复杂,且具有偏移特征,不易对其进行分类。为深入剖析裂缝形态特征,以地表裂缝表面中点为原点,深度为纵轴,裂缝两侧发育位置为横轴,绘制裂缝剖面形态及宽度变化趋势如图12所示。基于裂缝宽度-深度变化,结合地表裂缝示踪开挖实际结果,将地表裂缝复杂的浅层形态划分为“类楔型”、“类梭型”和“类树枝分叉型”3类。

(1) “类楔型”裂缝。裂缝宽度变化趋势呈现“V”形态,表现出上宽下窄的发育特征(图12a、图12b、图12d),即裂缝表面开裂处宽度大,随深度增加,裂缝宽度越来越小,直至在某一深度裂缝宽度变为0(裂缝“尖灭”)。裂缝实际发育中,裂缝宽度不会随着裂缝发育深度的增加而表现出递减的标准线性变化趋势,而是在“0~表面宽度”内波动。

(2) “类梭型”裂缝。裂缝宽度变化趋势呈“梭”型变化,即裂缝表面宽度小,随着裂缝向下延伸,裂缝宽度呈“增大-减小”的变化特征(图12c)。实际发育中,裂缝宽度在“0~最大宽度”之间波动,在裂缝发育深度的中间位置附近,裂缝宽度达到最大。

(3) “类树枝分叉型”裂缝。裂缝在浅层地下次生出1条或者多条裂缝,形成了类似次生树枝一样的地下延展形态(图11b)。该类裂缝有主裂缝和次裂缝之分,主裂缝一般为“类楔形”或“类梭型”裂缝,而次生裂缝由主裂缝某一深度位置衍生而出,发育宽度较小,延伸长度稍短。

#### 2) 地表裂缝偏斜发育特征

裂缝原位示踪开挖过程中发现,地表裂缝并非沿着开裂面向下铅直发育,具有偏离铅直线的偏斜发育特征。通过设定坐标系统,统计分析2条开挖裂缝偏

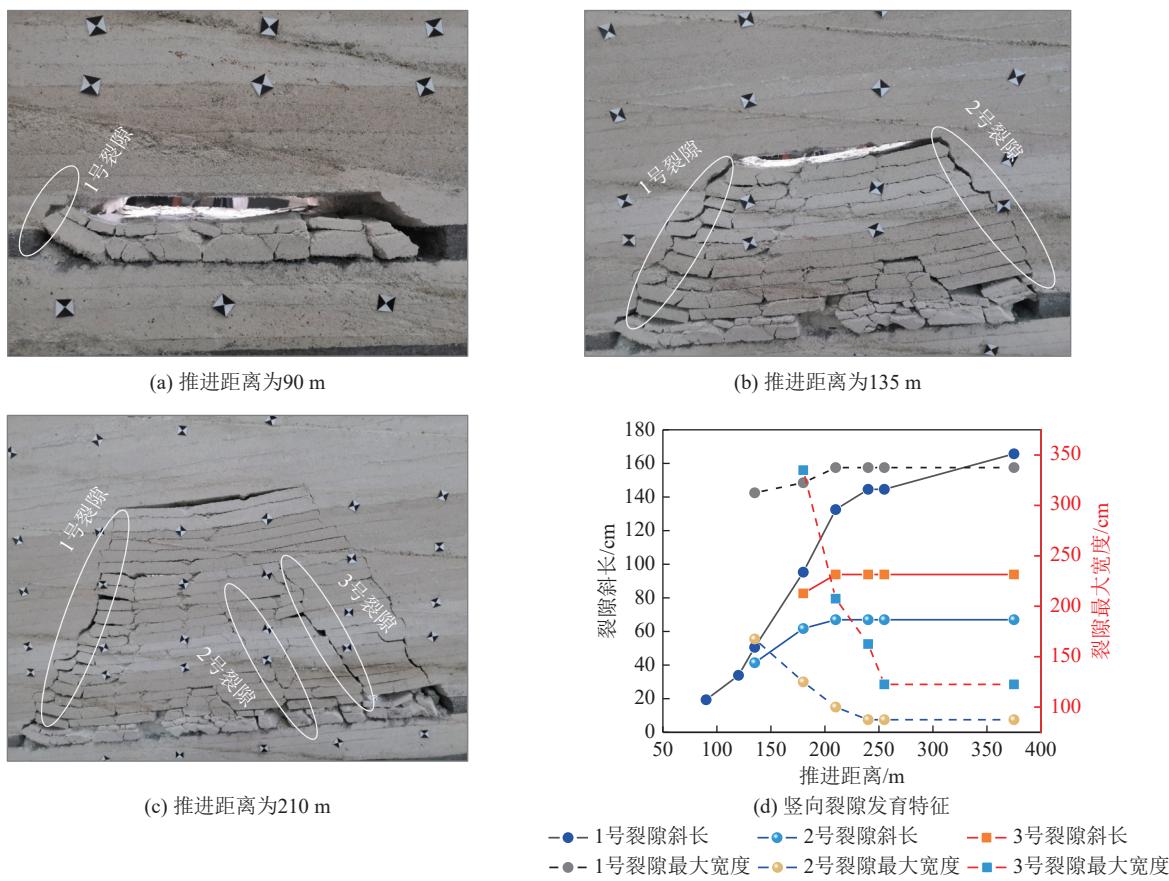


图 6 覆岩竖向裂隙演化过程及发育特征

Fig.6 Evolution process and development characteristics of vertical cracks in overlying rock

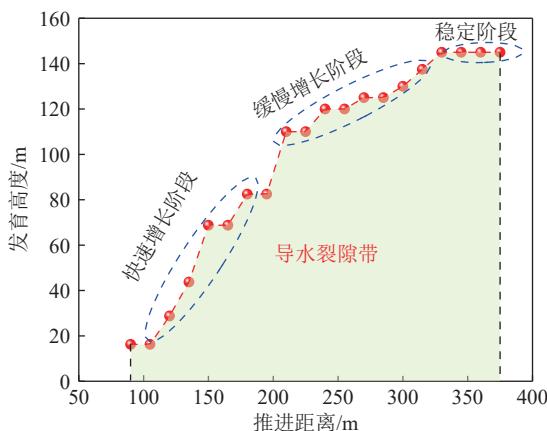


图 7 导水裂隙带发育高度

Fig.7 Height of water-conducting fracture zone

斜方向和数据。KL<sub>1</sub> 裂缝具有逆回采方向的偏斜波动发育特征, KL<sub>1</sub>-1 偏移量 ( $d_1$ ) 为 -6.23~1.28 cm, 平均为 -1.38 cm, KL<sub>1</sub>-2 位置裂缝偏移量 ( $d_2$ ) 为 -8.47~0 cm, 平均为 -3.51 cm, KL<sub>1</sub>-3 位置裂缝, 偏移量 ( $d_3$ ) 为 -6.74~0 cm, 平均为 -2.45 cm; 且裂缝偏斜量与深度 ( $h$ ) 线性相关(图 13a、图 13b)。KL<sub>2</sub> 裂缝具有朝采空区中心方向偏斜波动发育的特征, KL<sub>2</sub>-1 位置裂缝偏移量 ( $d$ ) 为 -1.81~29.51 cm, 平均为 5.39 cm, 延展方

向与  $X$  轴正方向一致, 裂缝偏移量与深度同样存在线性关系(图 13c、图 13d)。

### 3 地表裂缝深度发育特征

地表拉张裂缝的“尖灭”现象说明土体裂缝会在某一深度停止发育, 即裂缝发育深度具有极值。地表拉张裂缝深度数据见表 2。由表 2 可以看出, 小于 3.0 cm 的裂缝垂向发育深度在 1.70~3.10 m, 不超过 3.50 m。结合裂缝长度特征发现, 单位长度内裂缝垂向深度差 46.0~190.0 cm/m, 平均 132 cm/m。

对地表裂缝表面宽度与发育深度进行数据拟合发现, 2 者符合线性相关, 函数表达式为:  $h = 0.458w + 1.63$ ,  $R^2 = 0.703$ 。拟合结果如图 14 所示。

### 3.3 采动地表裂缝/隆起动态演化特征

#### 1) 采动地表裂缝/隆起动态扩展特征

I020213 工作面回采位置附近无裂缝产生, 而在位置后方发育地表隆起。地表隆起断续式向两侧延伸, 呈单侧隆起特征, 朝向与回采方向一致。新生地表隆起滞后回采位置发育, 滞后距 24.7~71.3 m, 平均 43.7 m(表 3、图 15)。

#### 2) 采动地表裂缝/隆起活动特征

随工作面回采, 地表隆起高度呈现“增加-稳定”



图8 地表损伤形式  
Fig.8 Form of surface damage

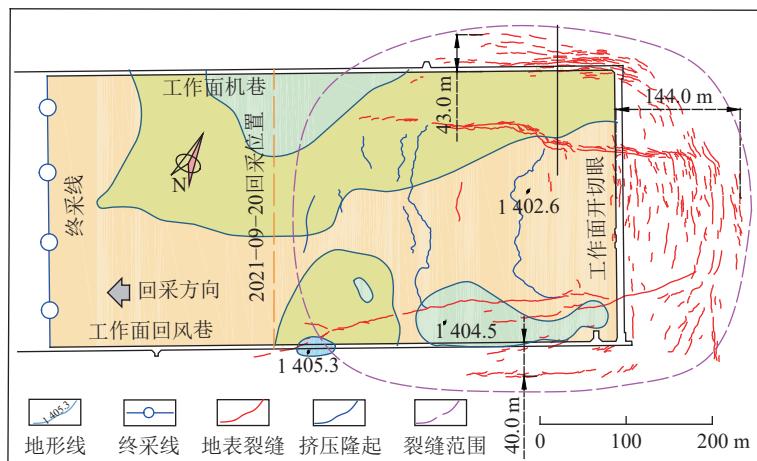


图9 I020213 工作面地表裂缝分布  
Fig.9 Distribution characteristics of surface cracks in I020213 working face

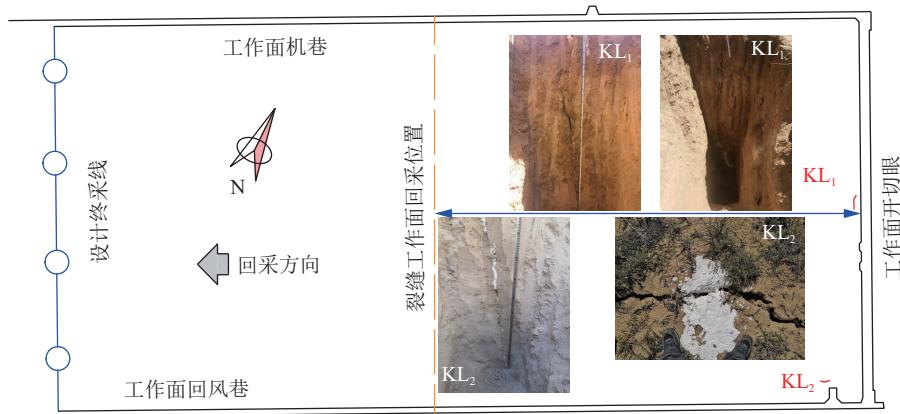


图10 裂缝原位示踪与开挖  
Fig.10 In-situ tracing and excavation of surface crack

的“无峰”动态变化特征,对应了隆起“产生-发育-稳定”的活动特征(图16)。面内地表隆起活动时间为11~13 d,平均活动时间约为12.5 d,隆起速度为0.25~0.50 cm/d,平均0.38 cm/d;以3.9 m/d的平均回采进度计算,挤压隆起活动期间工作面回采进度约为48.8 m,约为1.5个基本顶周期来压步距长,表明隆起活动时间较短,地表移动变形相对剧烈。

边界裂缝活动特征如图17所示。由图17可以

看出,工作面边界裂缝在拉张作用下呈现“持续增大-稳定”和“开裂-稳定”2种变化特征,裂缝宽度均表现出“由小-大”的变化特征,前者裂缝活动时间较长,为10~12 d,平均11.3 d,略小于面内隆起的平均活动时间,后者裂缝活动时间短,仅为2 d。

#### 4 采动地表裂缝/隆起形成机理

结合地表裂缝发育深度公式可知:I020213工作

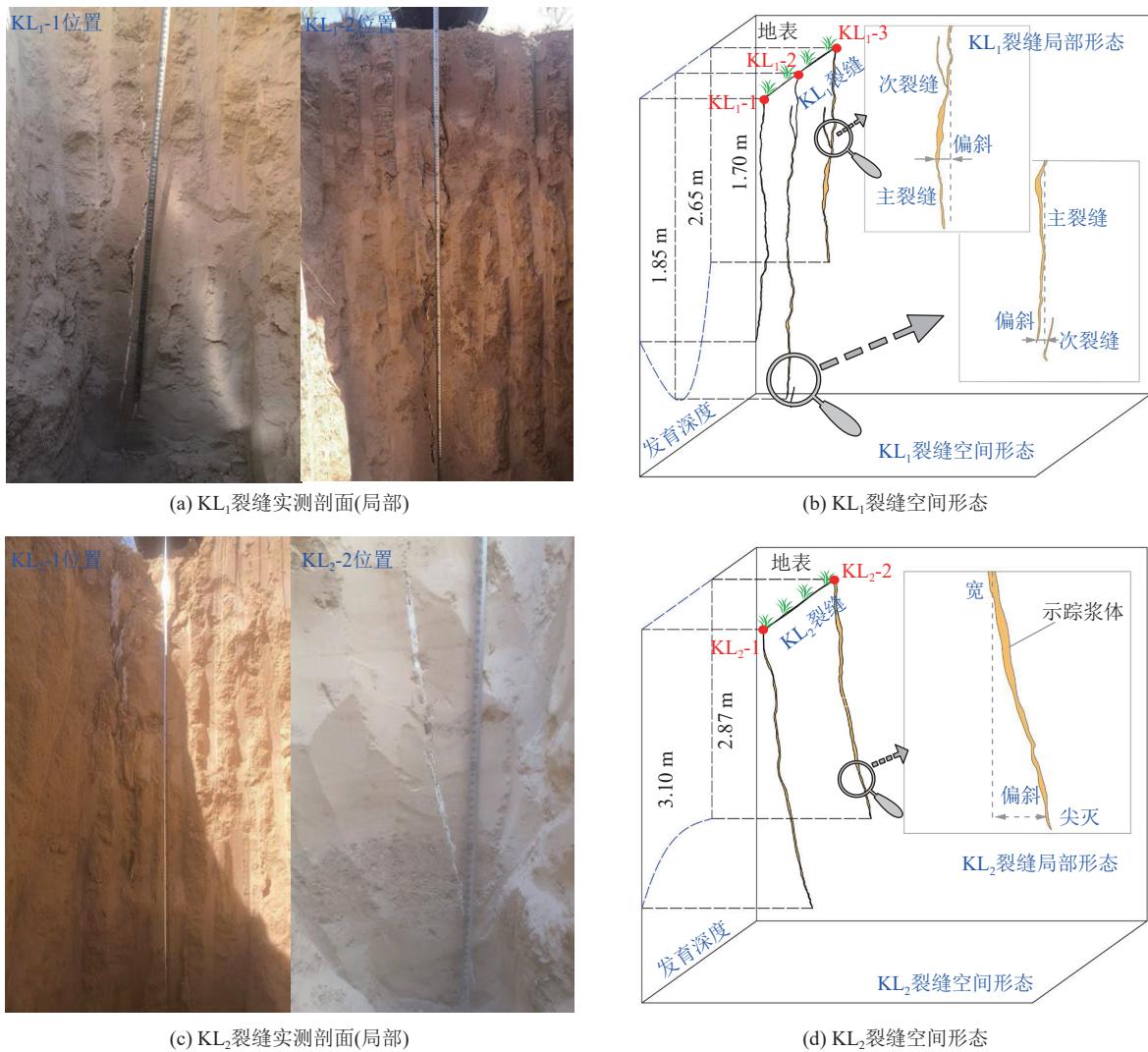


图 11 地表裂缝空间发育形态及深度

Fig.11 Spatial development morphology and depth of surface cracks

面地表裂缝最大发育深度为 9.87 m, 不与导水裂隙带内的上行裂隙贯通, 属于非贯通型裂缝。根据以往研究成果<sup>[19-21]</sup>, 非贯通地表裂缝是表土体在力的作用下发生非连续运动的产物, 其形成与演化和地表运移过程密切相关。缓倾斜煤层开采效应下表土体力学结构如图 18 所示。

为分析采动裂缝/隆起形成机理, 在此做出以下前提条件: ①在采动应力作用下, 表土体有沿着岩土界面下滑的运动趋势; ②地表裂缝是应力作用下表土块体沿着土体内部斜滑动面下滑造成的, 滑动面与岩土界面平行; ③不考虑土体静水压力的影响, 表土体在开采效应下开裂, 发育 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub> 裂缝, 并由此划分为 A 和 B 两个断裂块体。

以 A 块体进行力学分析, 如下:

A 块体垂向应力 F<sub>Av</sub>:

$$F_{Av} = G_A - F_A \cos \alpha + F'_A \sin \alpha \quad (2)$$

A 块体水平应力 F<sub>Ah</sub>:

$$F_{Ah} = F'_A \cos \alpha + F_A \sin \alpha - f_A \quad (3)$$

式中: G<sub>A</sub> 为 A 块体自重力, kN; F<sub>A</sub> 为岩土界面下基岩对 A 块体的支撑力, kN; F'<sub>A</sub> 为岩土界面下基岩对 A 块体的反作用力, kN; f<sub>A</sub> 为 A 块体的黏聚力, kN; α 为滑动面倾角, (°)。

根据以往研究成果<sup>[22]</sup>可知: 表层不规则单元整个表面所受的剪切应力为

$$Q = \int_0^p \int_0^z \tau dz dp = \int_0^p \int_0^z (C + \gamma z \tan \phi) dz dp \quad (4)$$

式中: Q 为块体单元变形破坏时的剪应力; τ 为作用在 A 块体边界元 σ<sub>p</sub> × σ<sub>z</sub> 的有效剪切应力, MPa; C 为岩土体黏聚力, kN/m<sup>2</sup>; φ 为岩土体内摩擦角, (°); z 为块体单元所处的埋深, 0 ≤ z ≤ h(土层厚度), m; γ 为土体容重, kN/m<sup>3</sup>。

因此, 通过垂向稳定系数 η<sub>v</sub> 表征表土块体抵抗剪

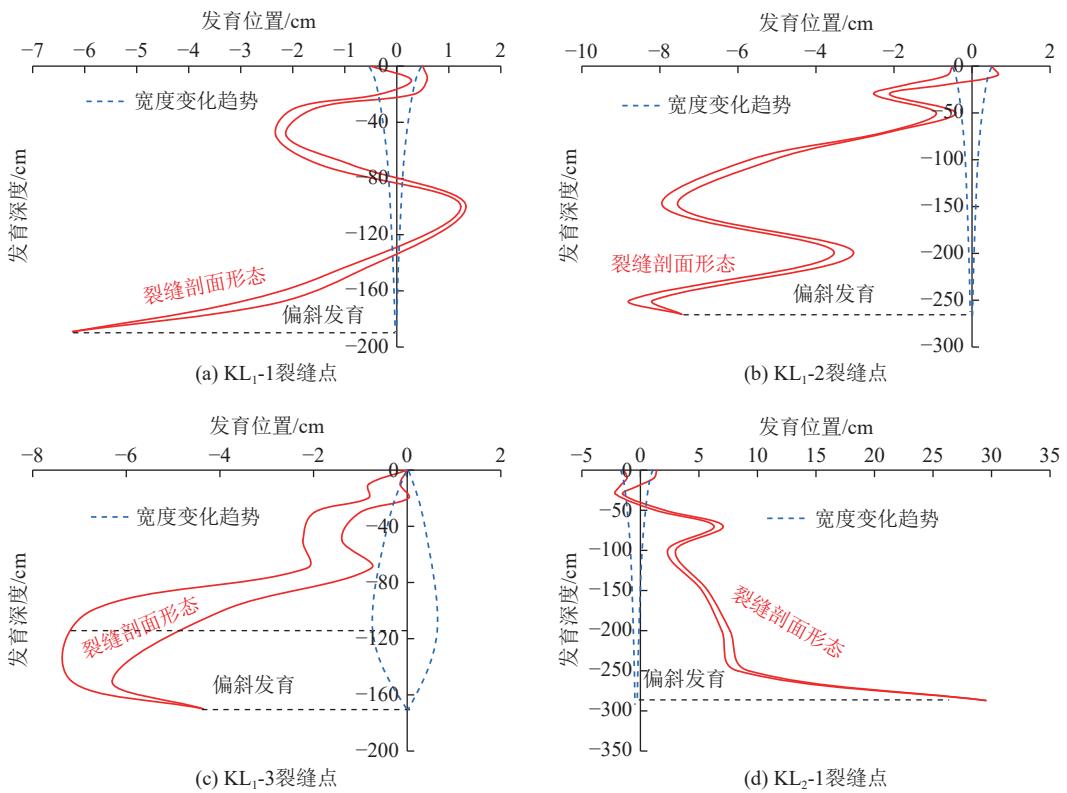


图 12 地表裂缝实测剖面形态及裂缝宽度变化趋势

Fig.12 Variation trend of profile shape and width of surface cracks

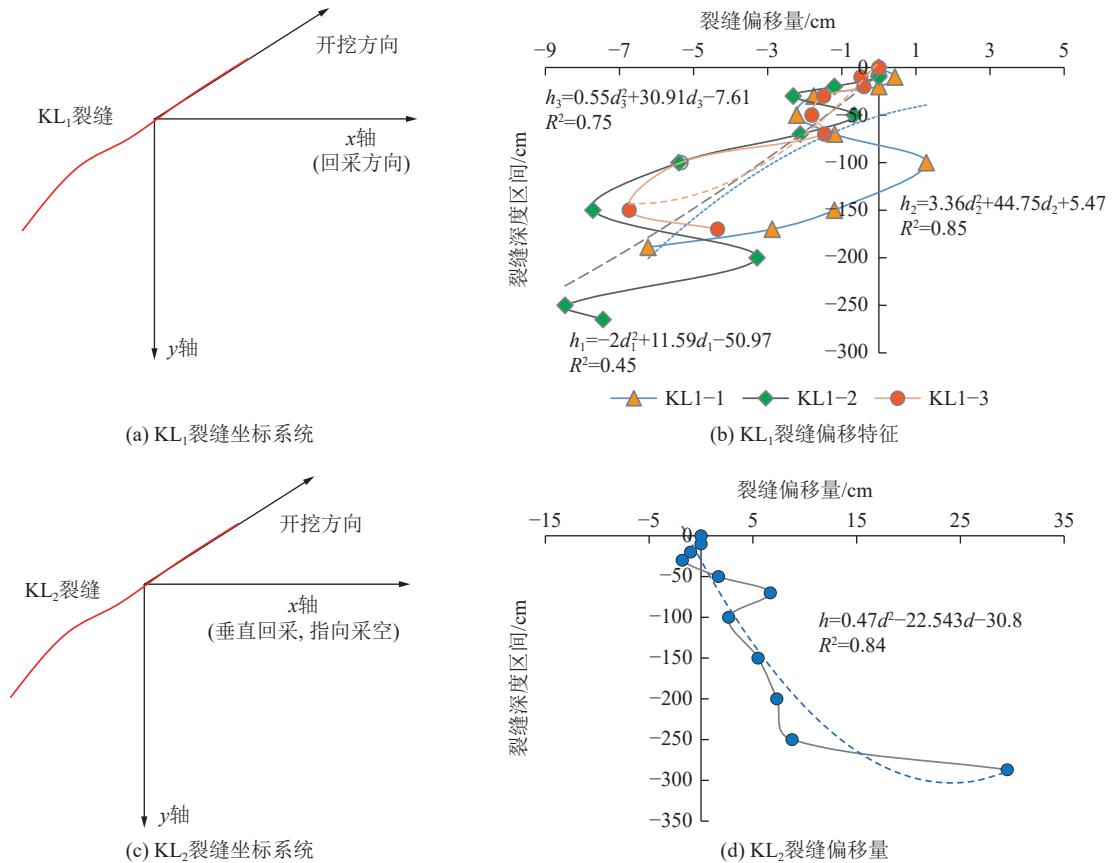


图 13 地表裂缝偏斜发育特征

Fig.13 Characteristics of skewed development of surface cracks

表2 地表拉张裂缝深度数据

Table 2 Depth data of tension surface crack

裂缝	开挖点	距灌浆点 距离/cm	宽度/cm	深度/m
KL <sub>1</sub>	KL <sub>1</sub> -1	0	1.0	1.85
	KL <sub>1</sub> -2	50	1.0	2.65
	KL <sub>1</sub> -3	100	0.8	1.70
KL <sub>2</sub>	KL <sub>2</sub> -1	0	3.2	3.10
	KL <sub>2</sub> -2	50	2.8	2.87

表3 I020213 工作面地表裂缝动态发育数据

Table 3 I020213 working face surface crack dynamic development data

观测日期	回采位置/m	最前端隆起 位置/m	滞后距/m	间距/m	最前端 隆起
2021-08-20	294.5	241.9	52.6		DJL1
2021-08-29	327.5	256.2	71.3	14.3	DJL3
2021-09-04	340.1	296.4	43.7	40.2	DJL4
2021-09-06	345.7	321.0	24.7	24.6	DJL5
2021-09-16	390.0	363.9	26.1	42.9	DJL6

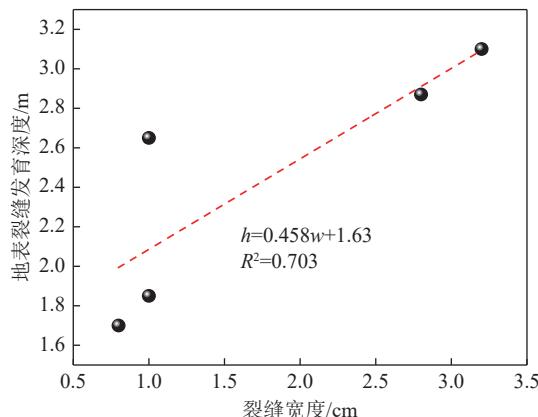


图14 地表裂缝发育深度与宽度的相关性

Fig.14 Correlation between the depth and width of surface crack development

切破坏的能力,同时也可作为判定地表发育台阶型裂缝的力学判据。就A块体而言,垂向稳定系数可以表示为

$$\eta_{Av} = \frac{F_A \cos \alpha}{G_A + F'_A \sin \alpha} \quad (5)$$

又因  $F_A$  的垂向分力与有效剪应力一致,所以垂向稳定系数可以表示为

$$\eta_{Av} = \frac{\int_0^{l_A} \left[ \int_0^z (C + \gamma z \tan \phi) dz \right] dx}{G_A + F'_A \sin \alpha} \quad (6)$$

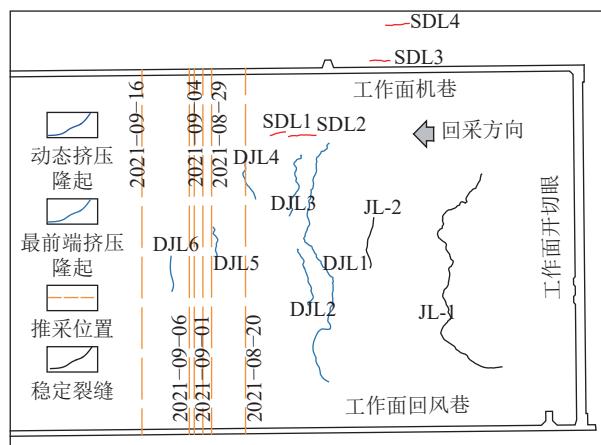


图15 地表裂缝/隆起动态扩展特征

Fig.15 Dynamic extension characteristics of surface cracks/uplifts

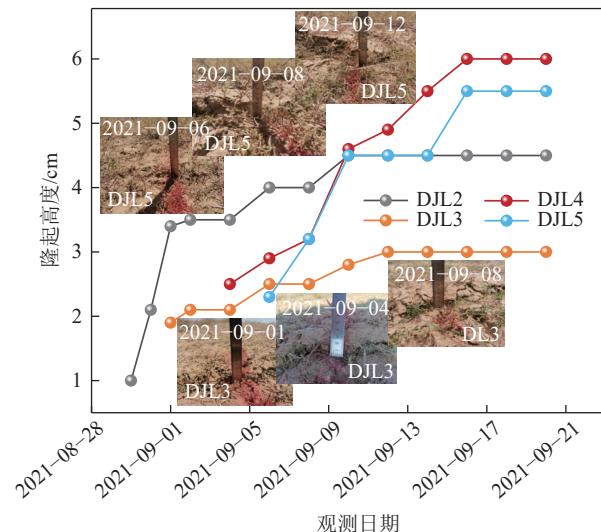


图16 地表隆起活动特征

Fig.16 Characteristics of surface uplift activity

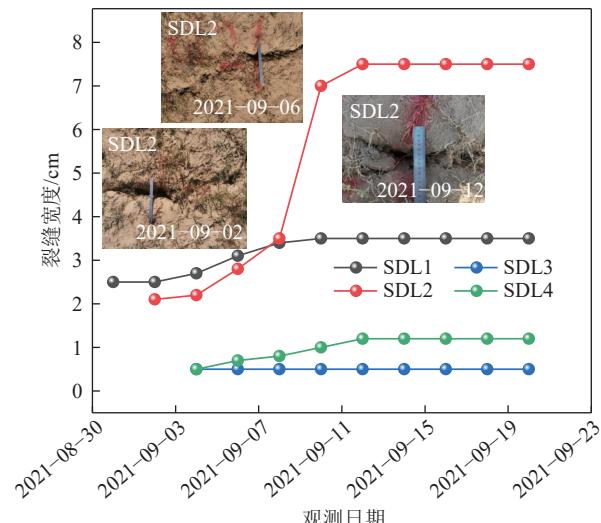


图17 边界裂缝活动特征

Fig.17 Activity characteristics of boundary crack

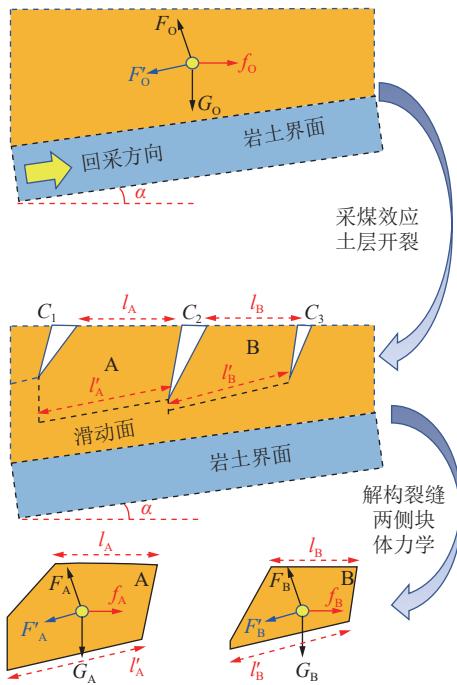


图 18 采煤效应下表土力学结构

Fig.18 Mechanical structure of surface soil under coal mining effect

当垂向稳定系数  $\eta_{Av} > 1$  时,说明块体 A 能够抵抗剪切破坏,不发育台阶裂缝;当  $\eta_{Av} < 1$  时,块体 A 发生剪切破坏,容易形成台阶裂缝。

同理,可以通过建立岩体块体的水平稳定系数表征块体抵抗水平拉张破坏的能力,同时作为地表发育拉张裂缝的力学判据。

$$\eta_{Ah} = \frac{f_A}{F'_A \cos \alpha + F_A \sin \alpha} \quad (7)$$

经分析,  $F'_A$  与下基岩对 A 的摩擦力相等,可表示为

$$F'_A = uG_A \cos \alpha \quad (8)$$

A 块体自身的黏聚力  $f_A$  可表示为

$$f_A = kCl'_A \quad (9)$$

由式(5)可知:

$$F_A = \frac{\int_0^{l_A} [ \int_0^z (C + \gamma z \tan \phi) dz ] dx}{\cos \alpha} \quad (10)$$

联合式(7)—式(10),水平稳定系数可以表示为

$$\eta_{Ah} = \frac{kCl'_A}{uG_A \cos \alpha^2 + \int_0^{l_A} [ \int_0^z (C + \gamma z \tan \phi) dz ] dx \tan \alpha} \quad (11)$$

根据 3.2 小节可知: 裂缝偏移量较小, 所以  $l'_A \approx l_A / \cos \alpha$ , 故水平稳定系数可以改写为

$$\eta_{Ah} = \frac{kCl_A}{uG_A \cos \alpha^3 + \int_0^{l_A} [ \int_0^z (C + \gamma z \tan \phi) dz ] dx \tan \alpha \cos \alpha} \quad (12)$$

式中:  $u$  为岩土界面摩擦因数;  $l_A$  为 A 块体顶界面水平长(裂缝间距),  $m$ ;  $\alpha$  为滑动面倾角, 与煤层倾角一致;  $k$  为土体侧压系数。当  $\eta_{Ah} < 1$  时, 土体较难抵抗拉张破坏, 容易形成拉张裂缝; 反之, 土体抵抗拉张的能力强, 不易形成拉张裂缝。

从上述水平稳定系数公式可知: 水平稳定系数与裂缝间距呈反比, 垂向稳定系数与其呈正比, 而面内地表裂缝的间距基本与顶板周期来压步距基本一致, 所以, 顶板周期来压步距越大, 地表越容易形成台阶裂缝, 顶板周期来压步距越小, 越容易形成拉张裂缝。

对上述稳定系数公式进行延伸, 可认为: 裂缝间距越大, 裂缝间土体水平稳定系数越大, 稳定性越强, 越不容易发生滑动或者或滑动量小。就相邻的 A 和 B 两个块体而言, 可通过分析 2 块体水平稳定系数确定裂缝的活动特征(表 4)。

表 4 地表裂缝活动类型判别

Table 4 Identification of surface crack activity types

判别标准	滑动量	裂缝宽度变化特征
$\eta_{Ah} \leq \eta_{Bh}$	$S_A > S_B$	增大-稳定
		开裂-稳定
$\eta_{Ah} > \eta_{Bh}$	$S_A < S_B$	增大-减小-稳定
$\eta_{Ah} > \eta_{Bh} > 1$	$S_A < S_B$	发育隆起

以长×宽×深为  $l \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的块体为研究对象, 利用提出的水平稳定系数及地表活动类型判别方法验证 I020213 工作面地表裂缝发育特征。

从表 5 计算结果可知: 工作面走向上  $\eta_h$  在 1.16~1.18 间, 平均为 1.17, 大于 1, 土体不容易形成拉张裂缝; 工作面倾向方向  $\eta_h$  为 0.68~1.19, 平均 0.91, 小于 1, 土体容易形成拉张裂缝。与实际观测结果基本一致。

从地表裂缝实测数据可以看出, SDL1 位于 SDL2 和 SDL3 之间, 与 SDL2 的间距为 4.2 m, 小于 SDL3 的间距为 63.0 m。经计算, SDL1—SDL2 之间 A 的  $\eta_{Ah}$  为 0.96; SDL1—SDL3 裂缝之间的 B 土体水平稳定系数( $\eta_{Bh}$ )为 1.19, 即  $\eta_{Ah} < \eta_{Bh}$ , 故依据表 4 可以判定, SDL1 裂缝宽度将表现出增大-稳定或开裂-稳定的变化特征, 与实测 SDL1 的裂缝宽度变化特征一致。

**表 5 红柳煤矿土体参数及水平稳定系数计算结果**  
**Table 5 Calculation results of soil parameters and horizontal stability coefficient in Hongliu Coal Mine**

计算参数	工作面走向	工作面倾向
$u$	0.30	0.30
$l/m$	28.4~40.5 (平均34.8)	1.4~63.0 (平均3.3)
$k$	0.4	0.4
$C/(kN \cdot m^{-2})$	15.0	15.0
$\alpha/(\circ)$	8.5	4.0
$\gamma/(kN \cdot m^{-2})$	18.5	18.5
$h/m$	1.0	1.0
土的内摩擦角/( $\circ$ )	45	45
水平稳定系数 $\eta_h$	1.16~1.18 (平均1.17)	0.68~1.19 (平均0.91)

注: 走向裂缝间距约等于顶板周期来压步距; 土体侧压系数、土体黏聚力、土体内摩擦角为经验值, 其余数据来源于《红柳井田煤炭补充勘探报告》。

## 5 结 论

1) I020213 工作面开采初次垮落步距 87.5 m, 周期垮落步距为 15.0~37.5 m, 平均 28.5 m。采空区上方覆岩破坏形态呈斜梯形, 采空压实区边界形似椭抛面, 且具有偏移特征; 下山采空区压实度为 77.72%~96.10%, 平均为 87.40%, 上山采空区压实度为 61.14%~80.44%, 平均为 73.20%, 下山采空区压实度约为上山采空区压实度的 1.2 倍。缓倾斜煤层仰采顶板覆岩以“悬臂-断裂-铰接-垮落回转-滑移-稳定”的重复性结构向前扩展演化。

2) 采动离层裂隙宽度具有“增大-减小”的动态变化特征, 对应离层裂隙“产生-扩展-闭合-稳定”的动态演化过程; 坚向裂隙斜长具有“增大-稳定”的特征, 裂隙宽度则表现出“增大-稳定”和“增大-减小-稳定”的动态特征; 导水裂隙带发育高度表现出“快增-缓增-稳定”的递进式发育特征, 发育高度为 145 m, 裂采比为 24.2。

3) I020213 工作面内地表隆起为单向隆起且隆起朝向与回采方向一致; 隆起高度为 2.7~36.0 cm, 平均为 10.14 cm。边界裂缝类型为拉张裂缝和台阶裂缝, 宽度为 1.5~18.0 cm, 落差最大约 17.0 cm。地表裂缝浅层形态分为“类楔型”、“类梭型”和“类树枝分叉型”3 类, 且具有偏斜特征, 偏移量与裂缝发育深度呈线性相关。宽度小于 3.0 cm 的裂缝垂向发育深度为 1.70~3.10 m, 平均垂向深度差为 132 cm/m, 裂缝发育深度与宽度符合线性函数关系。

4) 新生地表隆起滞后回采位置发育, 滞后距为

24.7~71.3 m, 平均为 43.7 m; 隆起高度均呈现“增加-稳定”的动态变化特征, 活动时间为 11~13 d, 平均活动时间为 12.5 d。边界裂缝在拉张作用下呈现“持续增大-稳定”和“开裂-稳定”2 种无闭合的变化特征, 活动时间为 2~12 d。

5) 地表裂缝发育类型及活动特征均与裂缝间距(顶板周期来压步距)密切相关。顶板周期来压步距越大, 地表越容易形成台阶裂缝; 反之, 越容易形成拉张裂缝。裂缝间距越大, 裂缝间土体水平稳定系数越大, 稳定性越强, 越不容易发生滑动或者滑动量小, 即裂缝无闭合活动特征; 反之, 则存在闭合过程。

## 参 考 文 献(References):

- [1] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973~984.  
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973~984.
- [2] 王双明, 刘浪, 朱梦博, 等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152~171.  
WANG Shuangming, LIU Lang, ZHU Mengbo, et al. New way for green and low-carbon development of coal industry under the target of “dual-carbon” [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152~171.
- [3] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 25~32.  
WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 25~32.
- [4] 谢晓深, 侯恩科, 龙天文, 等. 浅埋缓倾斜煤层开采覆岩及地表裂缝发育规律与形成机理[J]. 西安科技大学学报, 2022, 42(2): 200~209.  
XIE Xiaoshen, HOU Enke, LONG Tianwen, et al. Development law and formation mechanism of overburden and surface cracks induced by inclined coal seam mining in shallow buried area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022, 42(2): 200~209.
- [5] 陈绍杰, 张立波, 李振华, 等. 采煤沉陷区土地建筑利用研究进展与展望[J]. 绿色矿山, 2023, 1(1): 101~118.  
CHEN Shaojie, ZHANG Libo, LI Zhenhua, et al. Research progress and prospect of building utilization in coal mining subsidence areas[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 101~118.
- [6] 范立民, 张晓团, 向茂西, 等. 浅埋煤层高强度开采区地裂缝发育特征: 以陕西榆神府矿区为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1442~1447.  
FAN Limin, ZHANG Xiaotuan, XIANG Maoxi, et al. Characteristics of ground fissure development in high intensity mining area of shallow seam in Yushenfu coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1442~1447.
- [7] 侯恩科, 谢晓深, 王双明, 等. 中埋深煤层综采地表裂缝发育规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(6): 1178~1188.  
HOU Enke, XIE Xiaoshen, WANG Shuangming, et al. Development law of ground cracks induced by fully-mechanized mining of medium-

- buried coal seams[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(6): 1178–1188.
- [8] LONG Tianwen, HOU Enke, XIE Xiaoshen, et al. Study on the damage characteristics of overburden of mining roof in deeply buried coal seam[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 11141.
- [9] HUANG Qingxiang, DU Junwu, CHEN Jie, et al. Coupling control on pillar stress concentration and surface cracks in shallow multi-seam mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 31(1): 95–101.
- [10] 左建平,于美鲁,孙运江,等.采矿岩层破断力学及内外类双曲线整体移动模型[J].中国科学基金,2022,36(1):128–136.
- ZUO Jianping, YU Meilu, SUN Yunjiang, et al. Mining strata fracture mechanics and inner and outer analogous hyperbola integral movement model[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(1): 128–136.
- [11] SUN Yunjiang, ZUO Jianping, KARAKUS Murat, et al. A new theoretical method to predict strata movement and surface subsidence due to inclined coal seam mining[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(6): 2723–2740.
- [12] XIE Xiaoshen, HOU Enke, WANG Shuangming, et al. Formation mechanism and the height of the water-conducting fractured zone induced by middle deep coal seam mining in a sandy region: A case study from the Xiaobaodang coal mine[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6684202.
- [13] 徐祝贺,李全生,李晓斌,等.浅埋高强度开采覆岩结构演化及地表损伤研究[J].煤炭学报,2020,45(8):2728–2739.
- XU Zhuhe, LI Quansheng, LI Xiaobin, et al. Structural evolution of overburden and surface damage caused by high-intensity mining with shallow depth[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(8): 2728–2739.
- [14] 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.
- [15] WANG Qiang, REN Zhaopeng, BAI Qingsheng, et al. Characterizing the effect of longwall retreating speeds on overburden and sur-
- face synergistic subsidence behaviors with a thick coal seam: Intensive field measurements[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2024, 21(1): 169–183.
- [16] BAI Erhu, GUO Wenbing, TAN Yi. Negative externalities of high-intensity mining and disaster prevention technology in China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(7): 5219–5235.
- [17] 郭文兵,白二虎,赵高博.高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J].煤炭学报,2020,45(2):509–523.
- GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2): 509–523.
- [18] 李树刚,刘李东,赵鹏翔,等.综采工作面覆岩压实区裂隙动态演化规律影响因素分析[J].*煤炭科学技术*,2022,50(1):95–104.
- LI Shugang, LIU Lidong, ZHAO Pengxiang, et al. Analysis and application of fracture evolution law of overburden compacted area on fully-mechanized mining face under multiple factors[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 95–104.
- [19] LIU Hui, DENG Kazhong, ZHU XiaoJun, et al. Effects of mining speed on the developmental features of mining-induced ground fissures[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(8): 6297–6309.
- [20] CUI Ximin, GAO Yongge, YUAN Debao. Sudden surface collapse disasters caused by shallow partial mining in Datong coalfield, China[J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(2): 911–929.
- [21] 谢晓深,侯恩科,冯栋,等.榆神府矿区采煤地表裂缝发育规律及特征[J].工程科学学报,2023,45(1):44–53.
- XIE Xiaoshen, HOU Enke, FENG Dong, et al. Development law and characteristics of surface cracks caused by coal mining in Yushenfu mining area[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 44–53.
- [22] 朱恒忠.西南山区浅埋煤层采动地裂缝发育规律及减损控制[D].北京:中国矿业大学(北京),2019.
- ZHU Hengzhong. Developmental regularity and reduction control technology of mining-induced ground fissures of shallow burial coal seam in mountainous area of southwestern China[D]. Beijing: China University of Mining & Technology–Beijing, 2019.